



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΜΔΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

---

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Εκτίμηση της  
Διάβρωσης και της Αστοχίας του Πρανούς του  
Ποταμού Κοιλιάρη»**



**Λιλλή Μαρία**

**Υπό την επίβλεψη του: Δρ. Ν. Νικολαΐδη**

**Χανιά, 2011**

Ευχαριστώ πολύ όλους όσους - με την πολύτιμη βοήθειάς τους - συνετέλεσαν ώστε να διεκπεραιωθεί η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή και ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη...

## Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας γίνεται ανάλυση των παραμέτρων που συντελούν στη διάβρωση του ποδιού και των παρόχθιων ποτάμιων συστημάτων στα πλαίσια του ελληνικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου "Bank Stability and Toe Erosion Model", που δημιουργήθηκε από τους Andrew Simon, Andrea Curini, Robert Thomas και Natasha Bankhead, μέλη του Εθνικού Εργαστηρίου Ιζηματοποίησης (National Sedimentation Laboratory) του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (US Department of Agriculture), γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της διάβρωσης του ποδιού και της σταθερότητας ή μη της όχθης του ποταμού Κοιλιάρη και του Ευρώτα, που ανήκουν στον ελληνικό χώρο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενικότερη εισαγωγή στους σκοπούς και τους στόχους της παρούσης εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά γενικά τη διάβρωση των εδαφών και τη μοντελοποίηση αυτών ανά την πάροδο των ετών, και καταλήγει στη μοντελοποίηση της διάβρωσης των πρανών και συγκεκριμένα στο μοντέλο BSTEM.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία που αφορά τα πρανή γενικά και περιέχει στοιχεία ακόρεστης μηχανικής. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ώστε να βρεθεί ο συντελεστής ασφαλείας με βάση τον οποίο διαπιστώνεται αν το πρανές είναι σταθερό ή όχι.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση του μοντέλου και του τρόπου λειτουργίας του. Αρχικά παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το μοντέλο και στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή βήμα-βήμα της χρήσης του μοντέλου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της περιοχής μελέτης που περιλαμβάνει κλιματολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά καθώς και μορφολογικά χαρακτηριστικά, της λεκάνης απορροής.

Στο έκτο κεφάλαιο δίνεται εκτενώς η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο όσο και για τις άλλες προσεγγίσεις που έγιναν για να εκτιμηθεί συμπληρωματικά η διάβρωση και η αστοχία στο πρανές των ποταμών που μελετήθηκαν.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί ακριβέστερα η ποσότητα της διάβρωσης και η αστοχία του πρανούς.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθηκαν από τη μεταπτυχιακή αυτή διατριβή και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του εν λόγω θέματος.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή - Σκοπός.....                                  | 6  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....                          | 11 |
| 2.1 Διάβρωση.....                                                   | 11 |
| 2.1.1 Τύποι διάβρωσης.....                                          | 13 |
| 2.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του εδάφους.....        | 15 |
| 2.2 Η μοντελοποίηση της διάβρωσης .....                             | 19 |
| 2.3 Μοντελοποίηση διάβρωσης με τη βοήθεια του BSTEM .....           | 22 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σταθερότητα πρανών .....                                | 26 |
| 3.1 Γενικά στοιχεία .....                                           | 26 |
| 3.2 Τύποι αστοχίας όχθης ποταμού.....                               | 26 |
| 3.3 Σταθερότητα της όχθης ποταμού.....                              | 28 |
| 3.4 Αλγόριθμοι σταθερότητας όχθης ποταμού.....                      | 29 |
| 3.4.1 Οριζόντια στρώματα.....                                       | 29 |
| 3.4.2 Κατακόρυφες λωρίδες .....                                     | 30 |
| 3.4.3 Διατμητική αστοχία προβόλου .....                             | 32 |
| 3.4.4 Σταθερότητα όχθης βάσει του συντελεστή ασφαλείας .....        | 33 |
| 3.5 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού (Toe Erosion Model).....               | 34 |
| 3.5.1 Υπολογισμός μέσης οριακής διατμητικής τάσης ( $\tau_o$ )..... | 34 |
| 3.5.2 Συντελεστής διάβρωσης και κρίσιμη διατμητική τάση.....        | 35 |
| 3.5.3 Ποσοστά και ποσά διάβρωσης .....                              | 36 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή μοντέλου BSTEM.....                           | 37 |
| 4.1 Μοντέλο Σταθερότητας της Όχθης (Bank Stability Model).....      | 37 |
| 4.2 Μοντέλο Διάβρωσης Ποδιού της όχθης (Toe Erosion Model).....     | 38 |
| 4.3 Δομή του μοντέλου.....                                          | 39 |
| 4.4 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου.....                             | 40 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιοχή μελέτης .....                                   | 46 |
| 5.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή.....                     | 46 |
| 5.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά .....                                | 48 |
| 5.3 Γεωλογία.....                                                   | 50 |
| 5.4 Υδρογεωλογία.....                                               | 52 |
| 5.5 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά.....                               | 55 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μεθοδολογία .....                                                      | 57 |
| 6.1 Συλλογή δεδομένων.....                                                         | 58 |
| 6.2 Ανάλυση υδρογραφήματος.....                                                    | 63 |
| 6.3 Προσομοίωση διάβρωσης μέσω BSTEM- Καθορισμός ορίων αστοχίας.....               | 64 |
| 6.3 Επαλήθευση μοντέλου BSTEM και μεθοδολογίας διάβρωσης.....                      | 66 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα-Συζήτηση .....                                            | 68 |
| 7.1 Αποτελέσματα σεναρίων Α' & Β' .....                                            | 68 |
| 7.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης .....                                        | 76 |
| 7.3 Υπολογισμός απορροής σε πλημμυρικά γεγονότα .....                              | 77 |
| 7.4 Αποτελέσματα συσχέτισης αστοχίας με την απορροή και το υλικό .....             | 77 |
| 7.5 Μαθηματική εξίσωση συσχέτισης αστοχίας με την απορροή και το υλικό.....        | 79 |
| 7.6 Εκτίμηση διάβρωσης με τη βοήθεια του δείκτη Bank Erosion Indicator (BEI) ..... | 79 |
| 7.7 Επαλήθευση μοντέλου BSTEM .....                                                | 82 |
| 7.8 Εφαρμογή και επαλήθευση της μεθοδολογίας της διάβρωσης στον ποταμό Ευρώτα....  | 84 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα.....                                                      | 86 |
| Βιβλιογραφία .....                                                                 | 89 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1.1: Ανθρωπογενής υποβάθμιση του εδάφους στην Ευρώπη (Μ ha)               | 7  |
| Πίνακας 3.1: Περιγραφή κινητήριων δυνάμεων και δυνάμεων αντίστασης                | 33 |
| Πίνακας 6.1: Περιγραφή θέσεων που μελετήθηκαν ως προς τη διάβρωση και την αστοχία | 60 |
| Πίνακας 6.2: Περιγραφή κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν                              | 62 |
| Πίνακας 7.1: Δεδομένα εισαγωγής στο BSTEM για όλες τις θέσεις για το Α' Σενάριο   | 69 |
| Πίνακας 7.2: Δεδομένα εισαγωγής στο BSTEM για όλες τις θέσεις για το Β' Σενάριο   | 71 |
| Πίνακας 7.3: Ποσοτικά αποτελέσματα διάβρωσης σύμφωνα με το Α' σενάριο             | 73 |
| Πίνακας 7.4: Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας σύμφωνα με το Α' σενάριο              | 74 |
| Πίνακας 7.5: Ποσοτικά αποτελέσματα διάβρωσης σύμφωνα με το Β' σενάριο             | 74 |
| Πίνακας 7.6: Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας σύμφωνα με το Β' σενάριο              | 75 |
| Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης                                    | 76 |
| Πίνακας 7.8: Απορροή ανά πλημμυρικό γεγονός                                       | 77 |
| Πίνακας 7.9: Υπολογισμός του δείκτη διάβρωσης για το υδρολογικό έτος 2005-2006    | 80 |
| Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα μοντέλου στον ποταμό Ευρώτα                            | 85 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1.1α & 1.1β: Μορφές διάβρωσης εδάφους                        | 6  |
| Εικόνα 1.2α & 1.2β: Διάβρωση ποτάμιων συστημάτων                    | 9  |
| Εικόνα 2.1: Επιφανειακή διάβρωση του εδάφους                        | 14 |
| Εικόνα 2.2: Αυλακωτή διάβρωση του εδάφους                           | 15 |
| Εικόνα 2.3: Χαραδρωτική διάβρωση του εδάφους                        | 15 |
| Εικόνα 6.1: Κρισιμα σημεία παρόχθιας διάβρωσης στον ποταμό Κοιλιάρη | 58 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Εικόνα 6.2:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε | 59 |
| <b>Εικόνα 6.3:</b> Απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε              | 61 |
| <b>Εικόνα 6.4:</b> Διαβρωση στην παρόχθια περιοχή της Σπάρτης- Φυτοαποκατάσταση             | 67 |

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

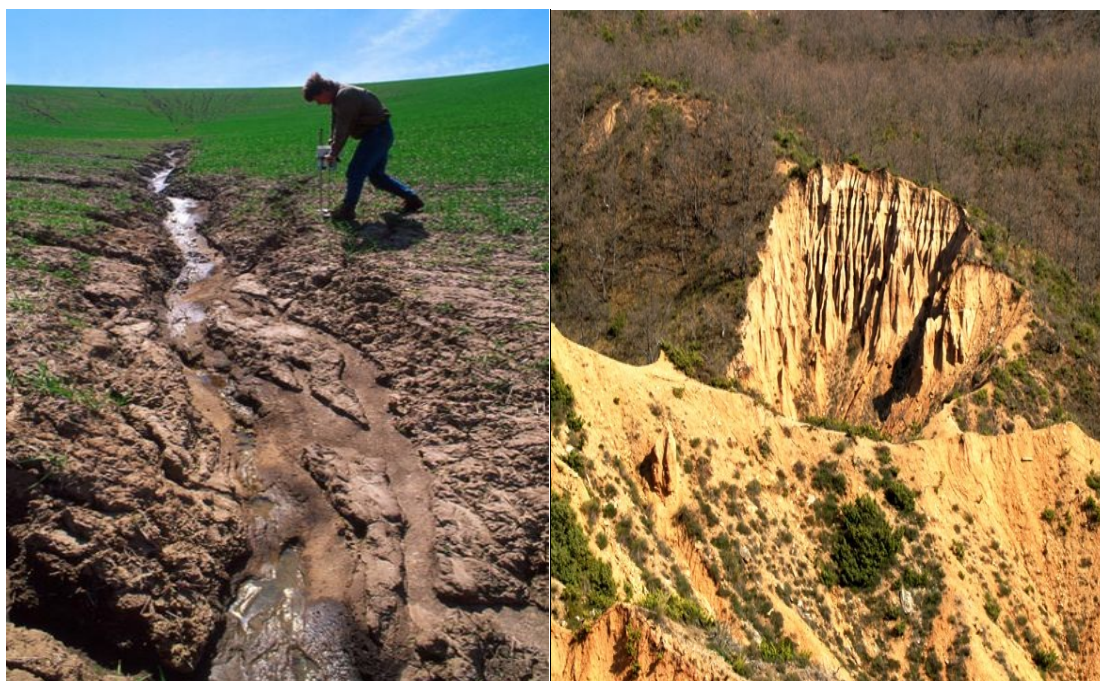
|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Σχήμα 3.1:</b> Επιλογή τύπων αστοχιών που παρατηρούνται στο πεδίο         | 27 |
| <b>Σχήμα 3.2:</b> Διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια                | 30 |
| <b>Σχήμα 3.3:</b> Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής και υδραυλικών ακτινών | 34 |
| <b>Σχήμα 5.1:</b> Σκαριφηματική γεωλογική τομή ανάντη των πηγών Στύλου       | 53 |
| <b>Σχήμα 5.2:</b> Μέσες τιμές βροχόπτωσης για το διάστημα 1958-1997          | 56 |
| <b>Σχήμα 5.3:</b> Μέσες τιμές βροχόπτωσης το έτος 2007                       | 56 |
| <b>Σχήμα 6.1:</b> Υδρογράφημα Κοιλιάρη για την περίοδο των ετών 2004-2010    | 64 |
| <b>Σχήμα 7.1:</b> Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας με την απορροή και το υλικό | 78 |
| <b>Σχήμα 7.2:</b> Συσχέτιση δείκτη διάβρωσης με την απορροή                  | 81 |
| <b>Σχήμα 7.3:</b> Προφίλ διαβρωμένης όχθης πριν την τοποθέτηση λιθοδομών     | 82 |
| <b>Σχήμα 7.4:</b> Προφίλ διαβρωμένης όχθης μετά την τοποθέτηση λιθοδομών     | 83 |
| <b>Σχήμα 7.5:</b> Σύγκριση τιμών ΒΕΙ του Ευρώτα με αυτές του Κοιλιάρη        | 84 |

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΧΑΡΤΩΝ**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Χάρτης 5.1:</b> Γεωγραφική θέση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη   | 46 |
| <b>Χάρτης 5.2:</b> Δήμοι στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη             | 47 |
| <b>Χάρτης 5.3:</b> Αεροφωτογραφία που διακρίνεται το ποτάμι                    | 48 |
| <b>Χάρτης 5.4:</b> Τοπογραφικές κλίσεις λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη  | 49 |
| <b>Χάρτης 5.5:</b> Ισοϋψείς καμπύλες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη | 49 |
| <b>Χάρτης 5.6:</b> Γεωλογικός χάρτης λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη     | 50 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή - Σκοπός

Η προστασία και η ορθολογική χρήση των εδαφικών πόρων και του νερού στη σύγχρονη εποχή αποτελούν οικουμενικό πρόβλημα. Το έδαφος, το νερό και ο αέρας είναι οι βασικοί παράγοντες για την ύπαρξη και την εξέλιξη της ζωής. Το πρόβλημα της προστασίας των εδαφών από τη διάβρωση αποκτά όλο και περισσότερη σημασία διότι η διάβρωση καταστρέφει τη δομή του εδάφους (Εικόνα 1.1α & 1.2β) και αποτελεί το σοβαρότερο παράγοντα που επιδρά αρνητικά στο φυσικό περιβάλλον διαταράσσοντας τη βιολογική ισορροπία του οικοσυστήματος (Μήτσιος κ.α., 1995).



**Εικόνα 1.1α & 1.1β: Μορφές διάβρωσης εδάφους**

**Πηγή:** [newworldencyclopedia.org](http://newworldencyclopedia.org)

**Πηγή:** [faosart-ianisdo.blogspot.com](http://faosart-ianisdo.blogspot.com)

Η διάβρωση του εδάφους από το νερό είναι ένα πολύ διαδεδομένο πρόβλημα σε όλη την Ευρώπη. Μια έκθεση για το Συμβούλιο της Ευρώπης παρέχει μια εκτίμηση του βαθμού υποβάθμισης του εδάφους και μερικά στοιχεία της υποβάθμισης αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1. (Van der Kniff J.M. et al, 2000).

**Πίνακας 1.1:** Ανθρωπογενής υποβάθμιση του εδάφους στην Ευρώπη (Μ ha)

| <b>Διάβρωση</b>                    | <b>Light</b> | <b>Moderate</b> | <b>Strong</b> | <b>Extreme</b> | <b>Συνολικά</b> |
|------------------------------------|--------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|
| Απώλεια<br>επιφανειακού<br>εδάφους | 18,9         | 64,7            | 9,2           | -              | 92,8            |
| Παραμόρφωση<br>εδάφους             | 2,5          | 16,3            | 0,6           | 2,4            | 21,8            |
| Συνολικά                           | 21,4         | 81              | 9,8           | 2,4            | 114,5           |
|                                    |              |                 |               |                | (52,3%)         |

Επιπλέον, η διάβρωση του εδάφους αποτελεί μια σημαντική πτυχή της υποβάθμισης του τοπίου στα ημίξηρα περιβάλλοντα της Μεσογείου (Mohamed A., 2007). Η υποβάθμιση αυτή του εδάφους, προέρχεται επίσης και από το συνδυασμό των αλλαγών στη χρήση γης, την εντατικοποίηση της γεωργίας και τις έντονες βροχοπτώσεις. Το φαινόμενο της διάβρωσης μπορεί να επιδεινωθεί στο μέλλον, σε πολλά μέρη του κόσμου, λόγω της κλιματικής αλλαγής που προβλέπεται να δημιουργήσει έναν πιο εντατικό υδρολογικό κύκλο (Amore et al., 2004).

Στην περιοχή της Μεσογείου, η διάβρωση είναι αρκετά σημαντική και σε πολλές περιοχές έχει φθάσει σε επίπεδα απώλειας σημαντικών ποσοτήτων εδάφους. Αυτό είναι αποτέλεσμα των μακρών περιόδων ξηρασίας τις οποίες ακολουθούν ισχυρές βροχοπτώσεις, που πέφτουν σε ασταθή εδάφη με απότομες κλίσεις. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη βορειοδυτική Ευρώπη, όπου η διάβρωση του εδάφους είναι μικρή, επειδή η βροχή που πέφτει στις κυρίως ομαλές πλαγιές είναι ομοιόμορφα καταμεμημένη σε όλο το έτος. Ως εκ τούτου, η περιοχή που επηρεάζεται από τη διάβρωση στη Βόρεια Ευρώπη είναι πολύ πιο περιορισμένη σε έκταση από ό, τι στη Νότια Ευρώπη (Van der Kniff J.M. et al, 2000).

Με δεδομένο τον αργό ρυθμό σχηματισμού του εδάφους, οποιαδήποτε απώλεια αυτού μεγαλύτερη από 1 tn/ha/yr θεωρείται ως μη αναστρέψιμη για χρονική περίοδο που εκτείνεται από 50-100 έτη. Απώλειες 20-40 tn/ha κατά τη διάρκεια μεμονωμένων καταιγίδων, που μπορεί να συμβούν μία φορά κάθε δύο ή τρία χρόνια, παρατηρούνται

συχνά πλέον στην Ευρώπη, ενώ σε ακραία γεγονότα λαμβάνει χώρα, πολλές φορές, απώλεια εδάφους μεγαλύτερη από 100 tn/ha (Morgan, 1992). Στην Ελλάδα, η διάβρωση του εδάφους πλήττει 3,3 εκατομμύρια εκτάρια, αριθμός που αντιστοιχεί στο 26,5% της συνολικής έκτασης της χώρας (Μήτσιος κ.α., 1995). Γι' αυτό το λόγο, ο Πάνου Δ.Α. (1982) χαρακτηρίζει τη διάβρωση «Λερναία Ύδρα» για τη χώρα μας.

Οι κύριοι παράγοντες αυτού του φαινομένου είναι η ροή του νερού και ο άνεμος. Επιπλέον, η καλλιέργεια, η εκμετάλλευση των δασών, η υπερβόσκηση, η χρήση των οχημάτων, η σκόπιμη καύση της βλάστησης και άλλες δραστηριότητες καθιστούν το έδαφος ευπαθές στη διάβρωση (Yassoglou et al., 1998). Συνεπώς, η ανθρώπινη παρέμβαση επιταχύνει τη διάβρωση και καταστρέφει σε λίγα χρόνια ό,τι η φύση δημιούργησε σε εκατοντάδες χρόνια.

Έντονο επίσης είναι το φαινόμενο αυτό της διάβρωσης και στα φυσικά πρηνή όπως π.χ. τα πρηνή των ποταμών (Εικόνα 1.2α & 1.2β). Σε γενικές γραμμές, τα πρηνή μπορεί να αστοχήσουν υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Το νερό λόγω της υποσκαπτικής δράσης του, αποσπά, παρασέρνει και μεταφέρει υλικά από το πόδι των πρηνών προς τα κατάντη. Εξ αιτίας της κάθετης εξέλιξης του φαινομένου σε σχέση με τον άξονα της ροής του νερού, η πρηνική διάβρωση παρουσιάζει τοπικό χαρακτήρα και τα υλικά που απάγονται και διακινούνται στην κοίτη είναι διαφόρων μεγεθών με μεγαλύτερη συμμετοχή μέσου μεγέθους και λεπτόκοκκων υλικών (Μουλόπουλος Χ., 1968). Το φορτίο των ιζημάτων που μεταφέρεται από τα ποτάμια παρουσιάζει μεγάλη γεωγραφική και χρονική διακύμανση. Οι διακυμάνσεις αυτές εμφανίζονται και προκαλούνται από τις κλιματικές αλλαγές και τη γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής του εκάστοτε ποταμού (Morehead M.D., 2002 ).



Εικόνα 1.2α & 1.2β: Διάβρωση ποτάμιων συστημάτων

Πηγή: [daskalosjf.blogspot.com](http://daskalosjf.blogspot.com)

Πηγή: [hn.cma.nsw.gov.au](http://hn.cma.nsw.gov.au)

Από τις πρώτες δεκαετίες του προηγούμενου αιώνα άρχισαν οι προσπάθειες για τη ανάπτυξη μοντέλων με σκοπό τη διερεύνηση και τη μελέτη των αστοχιών πρηνών και την ανάπτυξη μεθόδου ελέγχου της ευστάθειάς τους. Παρά τις τεράστιες προόδους που έχουν σημειωθεί μέχρι σήμερα, το θέμα δεν έχει κλείσει ακόμη, οι απαιτήσεις δεν είναι πλήρως στοχευμένες και οι προσπάθειες δεν έχουν ολοκληρωθεί.

Μια τέτοια προσπάθεια αποτελεί και η εν λόγω μελέτη. Στόχος της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση του κινδύνου της διάβρωσης και της σταθερότητας ή μη του πρηνούς του ποταμού Κοιλιάρη που βρίσκεται στο νομό Χανίων της Κρήτης. Στόχος επίσης της διατριβής αυτής, είναι να επιβεβαιωθεί η εν λόγω μεθοδολογία, αφού εφαρμοσθεί και σε έναν μεγαλύτερο ποταμό διαλείπουσας ροής, τον ποταμό Ευρώτα στο νομό Λακωνίας. Σκοπός της, η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων στις περιοχές μελέτης, που αφορούν τη διάβρωση και την αστοχία της όχθης καθώς επίσης και η πρόταση μέτρων προστασίας πρηνών.

Επομένως και από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως για την πρόληψη της περαιτέρω υποβάθμισης του εδάφους απαιτείται εφαρμογή κατάλληλων αντιδιαβρωτικών μέτρων. Επίσης, η στόχευση των στρατηγικών διαχείρισης των ιζημάτων αποτελεί βασική απαίτηση σε ημίξηρες περιοχές λόγω της μεγάλης διάβρωσης και των περιορισμένων διαθέσιμων πόρων. Για το σκοπό αυτό, η βιώσιμη διαχείριση του νερού και των εδαφικών πόρων απαιτεί την αποτελεσματική χρήση των μοντέλων πρόβλεψης και την ικανότητα να αναλύει τα δεδομένα στα πλαίσια της υψηλής χρονικής μεταβλητότητας των ημίξηρων περιοχών (Mohamed A., 2007). Τέλος η ανάγκη για προστασία των εδαφών γενικότερα, και των φυσικών πρανών ειδικότερα, είναι επιτακτική και πρέπει να αποτελεί χρέος και ύψιστη εθνική επιταγή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

### ***2.1 Διάβρωση***

Η διάβρωση του εδάφους είναι ένα γεωλογικό φαινόμενο αποτέλεσμα της απομάκρυνσης λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού από τον επιφανειακό ορίζοντα του εδάφους και η απόθεση τους σε άλλα σημεία της γήινης επιφάνειας ή στη θάλασσα. Αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο με ανυπολόγιστες οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Lai, 1994). Είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης του εδάφους, που προκαλεί σοβαρά προβλήματα σε οικοσυστήματα αλλά και σε κοινωνίες ανθρώπων. Τα προβλήματα που προκαλεί η διάβρωση δεν περιορίζονται μόνο στις περιοχές που απογυμνώνονται από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους αλλά και οι κάτοικοι αυτών των περιοχών αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της μείωσης των γεωργικών αποδόσεων και της επιτάχυνσης του φαινομένου της ερημοποίησης, με αποτέλεσμα τα προβλήματα αυτά να οδηγούν σε οικονομικά αδιέξοδα και κοινωνικές αναταράξεις. Ως κίνδυνος διάβρωσης (erosion hazard), μπορεί να περιγραφεί ως η πιθανότητα ότι επιταχυνόμενη διάβρωση θα αρχίσει να δρα μελλοντικά σε κάποια περιοχή. Στην περίπτωση που ήδη έχει αρχίσει η δράση της επιταχυνόμενης διάβρωσης, τότε ως κίνδυνος ορίζεται ο πιθανός βαθμός διάβρωσης που αναμένεται στο κοντινό μέλλον. Είναι ευνόητο ότι εάν ληφθούν μέτρα βελτίωσης ο κίνδυνος διάβρωσης μειώνεται σημαντικά (Συλλαίος κα, 2007).

Η διάβρωση του εδάφους ξεκινά όταν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την διηθητικότητα του εδάφους (infiltration) ή σε μια άλλη περίπτωση, όταν η βροχή πέφτει σε ένα κορεσμένο με νερό έδαφος εξαιτίας προγενέστερων συνθηκών υγρασίας ή λόγω αυξημένης υπόγειας στάθμης νερού. Έτσι, μένει νερό στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο θα κινηθεί χαμηλότερα στο ανάγλυφο εφόσον υπάρχει εδαφική κλίση συμπαρασέρνοντας και έδαφος (Μισοπολινός, 1992).

Η εδαφική διάβρωση είναι μια διαδικασία δύο φάσεων: αρχικά γίνεται απόσπαση λεπτόκοκκου υλικού από τη μάζα του εδάφους και στη συνέχεια ακολουθεί η μεταφορά του με το κινούμενο νερό ή τον άνεμο. Όταν δεν παρέχεται ικανή ποσότητα ενέργειας για τη μεταφορά τότε λαμβάνει μέρος μια τρίτη φάση, η απόθεση (Morgan, 1986).

Η διάβρωση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη απώλεια του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, το οποίο είναι και το πιο γόνιμο αφού στα 30 πρώτα εκατοστά του εδάφους υπάρχει συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων και οργανικής ουσίας. Η διάβρωση προκαλεί απώλεια θρεπτικών στοιχείων, μείωση της παραγωγικότητας του εδάφους και των αποδόσεων των καλλιεργειών (Renard et al., 1997). Οι απώλειες στην απόδοση μιας καλλιέργειας, μπορεί να φτάσουν το 30% της κανονικής, αν και δεν είναι πάντα άμεσα ορατές (Follet and Stewart, 1985). Η διάβρωση επηρεάζει την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό και μειώνει τη διηθητικότητά του. Ακόμη, λόγω της χαράδρωσης του εδάφους είναι δυνατόν να προκληθεί εκκρίζωση των φυτών ακόμα και δέντρων. Αυτή η μορφή υποβάθμισης της ποιότητας του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε προχωρημένο στάδιο στην ερημοποίηση, δηλαδή σε ακραία μορφή υποβάθμισης του εδάφους (Ζαλίδης, 2008).

Η διάβρωση έχει και έμμεσες συνέπειες στο περιβάλλον. Μια σημαντική επίπτωση είναι ο κίνδυνος πλημμύρων, λόγω της απορροής η οποία μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ιζημάτων στα κατώτερα αλλουβιακά πεδία (πεδινές περιοχές), μειώνοντας την ικανότητα μεταφοράς νερού των ποταμών. Μια άλλη επίδραση της διάβρωσης είναι η διατάραξη φυσικών οικοσυστημάτων από την απόθεση εδάφους, που αφαιρέθηκε από τις ανάντη καλλιεργούμενες εκτάσεις και πιθανότατα περιέχει ρύπους, όπως βαρέα μέταλλα, λιπάσματα, γεωργικά φάρμακα (Ζαλίδης, 2008). Ακόμη, η απόθεση εδαφικού υλικού σε υδάτινα οικοσυστήματα έχει επιπτώσεις οι οποίες συνοψίζονται στις εξής: α) φυσική ρύπανση επιφανειακών υδάτων, λόγω των εδαφικών τεμαχιδίων που παραμένουν σε αιώρηση σε υδατικά οικοσυστήματα προκαλείται αλλοίωση των πληθυσμιακών σχέσεων και β) χημική ρύπανση των υδάτων λόγω της μεγάλης αύξησης της συγκέντρωσης θρεπτικών στοιχείων, που προκαλείται από τον εμπλουτισμό των υδάτων με απορροές θρεπτικών στοιχείων

(νιτρικά και φωσφορικά ιόντα από λιπάσματα και απορρυπαντικά) που μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο του ευτροφισμού, το οποίο με τη σειρά του επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Εκτός όμως από τον καταστρεπτικό της ρόλο υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες η μετακίνηση του εδάφους χαμηλότερα στο ανάγλυφο είναι επιθυμητή. Αυτό συμβαίνει όταν περιοχές με σχετικά γόνιμο έδαφος δεν προτιμώνται για εκμετάλλευση λόγω χαμηλού οικονομικού ενδιαφέροντος (μπορεί για παράδειγμα να μην είναι εύκολη η εφαρμογή άρδευσης). Τότε η μετακίνηση του εδάφους σε περιοχή όπου οι συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές θα έχει ως αποτέλεσμα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη.

### ***2.1.1 Τύποι διάβρωσης***

Η διάβρωση του εδάφους διακρίνεται σε φυσική ή γεωλογική (geological erosion), η οποία εξελίσσεται με αργό ρυθμό στο φυσικό περιβάλλον που δεν έχει διαταραχθεί από τον ανθρώπινο παράγοντα και σε επιταχυνόμενη ή ανθρωπογενή διάβρωση (accelerated erosion), η οποία εξελίσσεται με γρήγορο ρυθμό και συναντάται εκεί όπου η βλάστηση και το έδαφος έχουν διαταραχθεί από τις ανθρώπινες επεμβάσεις (Μισοπολινός, 1992).

Υπάρχουν διάφορες μορφές διάβρωσης που διαχωρίζονται καταρχήν ως προς τα αίτια που την προκαλούν. Δυο είναι οι κύριοι τύποι διάβρωσης: (α) η διάβρωση από νερό της βροχής και (β) η διάβρωση που προκαλείται από τον άνεμο. Η διάβρωση με τον άνεμο δεν είναι τόσο συχνή στις Μεσογειακές συνθήκες, δεν παρατηρείται σε κάθε περιοχή ούτε οι συνέπειες της είναι τόσο καταστροφικές (Παναγιωτόπουλος, 2008). Επειδή όμως στη χώρα μας, η κύρια αιτία της καταστροφής της γεωργικής γης είναι η διάβρωση από το νερό, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στον τύπο αυτό. Η διάβρωση που προκαλεί το νερό αποτελεί τον πιο επιβλαβή τύπο διάβρωσης παγκοσμίως για τα εδάφη, όχι μόνο λόγω του όγκου του εδάφους που μετακινεί αλλά και λόγω του εύρους της περιοχής στην οποία επιδρά. Υπολογίζεται ότι 115

εκατομμύρια εκτάρια ή το 12% του συνόλου της ευρωπαϊκής χερσαίας έκτασης υπόκεινται σε διάβρωση από το νερό (Ζαλίδης, 2008). Η διάβρωση από το νερό διακρίνεται σε:

(α) *Επιφανειακή διάβρωση* (sheet erosion) (Εικόνα 2.1) η οποία αναφέρεται στην ομοιόμορφη απόσπαση και απομάκρυνση εδαφικού υλικού από την επιφάνεια του εδάφους (Hairsine and Rose, 1992). Η επιφανειακή διάβρωση είναι γενικά υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας εδάφους.



**Εικόνα 2.1:** Επιφανειακή διάβρωση του εδάφους

(β) *Αυλακωτή διάβρωση* (rill erosion) (Εικόνα 2.2) κατά την οποία εδαφικό υλικό παρασύρεται και απομακρύνεται από την κίνηση του νερού που σχηματίζει αυλάκια στην επιφάνεια (Παναγιωτόπουλος, 2008). Οι αυλακώσεις αυτές που δημιουργούνται στο έδαφος είναι δυνατόν να εξαλειφθούν με την εφαρμογή κατάλληλης κατεργασίας του εδάφους, όμως η απώλεια εδάφους που προκαλεί αυτός ο τύπος διάβρωσης προκαλεί αρκετά προβλήματα.



**Εικόνα 2.2:** Αυλακωτή διάβρωση του εδάφους

(γ) *Χαραδρωτική διάβρωση* (gully erosion) (Εικόνα 2.3) κατά την οποία σχηματίζονται βαθιές χαράδρες στις οποίες συγκεντρώνεται η ροή του νερού. Οι χαράδρες είναι τόσο βαθιές ώστε η παρουσία βλάστησης δεν είναι δυνατόν να τις εξαλείψει (Rose, 1993; Loch and Silburn, 1996). Η χαραδρωτική διάβρωση είναι ποσοτικά λιγότερο σημαντική αλλά είναι περισσότερο εμφανής και τοπικά πιο καταστρεπτική (Συλλαίος, 1990).



**Εικόνα 2.3:** Χαραδρωτική διάβρωση του εδάφους

### ***2.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του εδάφους***

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση από το νερό είναι το κλίμα, η τοπογραφία, το έδαφος, η βλάστηση και οι διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες (Kuznetsov et al., 1998).

**Κλίση:** Τα κύρια χαρακτηριστικά της κλίσης που επηρεάζουν τη διάβρωση είναι ο βαθμός κλίσης και το μήκος της κλίσης. Ο καθορισμός του τρόπου με τον οποίο ο βαθμός της κλίσης και το μήκος της κλίσης επηρεάζουν τη διάβρωση έχει

απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό τους επιστήμονες. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι δεδομένα για την επίδραση του μήκους και του βαθμού της κλίσης κάτω από φυσικές βροχοπτώσεις είναι σπάνια για κλίσεις πάνω από 16%, αφού τέτοιες συνθήκες δεν ευνοούν την καλλιέργεια (EL-Swaify, 1997).

Σε ότι αφορά τον βαθμό της κλίσης έχει βρεθεί πειραματικά ότι για κλίσεις μικρότερες του 10%, ο διπλασιασμός τους (π.χ. από 4% σε 8%) συνεπάγεται σχεδόν τον διπλασιασμό της απώλειας του εδάφους, ενώ κλίσεις μεγαλύτερες από 10% αποτελούν το κυριότερο εμπόδιο για την καλλιέργεια της γης (Συλλαίος, 1990). Το μήκος της κλίσης σχετίζεται με την ένταση της διάβρωσης. Οι μεγάλου μήκους κλίσεις δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα νερού, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ταχύτητα του νερού απορροής και συνεπώς η διάβρωση.

**Κλίμα:** Από τους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση σπουδαιότεροι είναι τα χαρακτηριστικά της βροχής όπως η διάρκεια, η ένταση, το μέγεθος και η κινητική ενέργεια των σταγόνων. Από τις πολλές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται, οι παρακάτω φαίνονται να ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες για τη μελέτη της διάβρωσης (Wischmeier, 1962):

1. το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης,
2. η μέση ένταση (συμπεριλαμβανομένων και των περιόδων ανομβρίας),
3. η μέση ένταση (της πραγματικής περιόδου βροχοπτώσεων), και
4. η μέση και η συνολική ένταση των ραγδαίων βροχοπτώσεων.

Οι πιο καταστρεπτικές βροχές είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ένταση και μεγάλο χρονικό διάστημα. Η ένταση της βροχής έχει μεγαλύτερη σημασία για τη διάβρωση από ότι το συνολικό ύψος βροχόπτωσης. Με την αύξηση όμως του όγκου του νερού μιας βροχόπτωσης, η ένταση μειώνεται λόγω εξάντλησης του διαθέσιμου νερού σε μικρό χρονικό διάστημα (Συλλαίος κα, 2007). Επίσης, η κατάσταση της υγρασίας του εδάφους κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης επιδρά στο ποσοστό απορροής. Η απορροή είναι μεγαλύτερη όταν το έδαφος είναι υγρό γιατί η υδατοικανότητα του είναι περιορισμένη. Για τη διάβρωση του εδάφους ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η κατανομή των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με την

κάλυψη του εδάφους που παρέχουν οι καλλιέργειες στις διάφορες εποχές.

**Έδαφος:** Στους εδαφικούς παράγοντες περιλαμβάνεται η διαβρωσιμότητα (soil erodibility), η οποία εκφράζει την επιδεκτικότητα ή την ευαισθησία του εδάφους στην απόσπαση και μετακίνηση τεμαχιδίων και δομικών μονάδων (Παναγιωτόπουλος, 2008). Ευθύνεται για την επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους στην απώλεια του εδάφους κατά τη διάρκεια γεγονότων βροχής (Renard et al., 1997). Η διαβρωσιμότητα εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους και επομένως διαφέρει από έδαφος σε έδαφος. Οι ιδιότητες του εδάφους που καθορίζουν τη διαβρωσιμότητα του είναι η διηθητικότητα, η διαπερατότητα, η υδατοϊκανότητα και η σταθερότητα των συσσωματωμάτων.

Διηθητικότητα της επιφάνειας του εδάφους είναι η ικανότητα που έχει η επιφάνεια του εδάφους να επιτρέπει ελεύθερα τη διέλευση νερού. Η μείωση της διήθησης με το χρόνο εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την επιδείνωση της διήθησης στην επιφάνεια του εδάφους η οποία μπορεί να οφείλεται στη δημιουργία κρούστας, στο σφράγισμα των πόρων και στο ψύχος στην περίοδο του χειμώνα.

Σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι η ικανότητα των συσσωματωμάτων να αντιστέκονται σε εξωτερικές δράσεις και ιδιαίτερα του νερού που τείνουν να τα διασπάσουν. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να εξετάζονται είναι ο αριθμός, το μέγεθος και το πορώδες που δημιουργείται μεταξύ και μέσα στα συσσωματώματα.

Η διαπερατότητα του εδάφους εξαρτάται από τον λιγότερο διαπερατό ορίζοντα της εδαφοτομής. Η τιμή της διαπερατότητας μεταβάλλεται λιγότερο εύκολα από την τιμή της διηθητικότητας αφού η δομή του εδάφους στο εσωτερικό του, αποκτά μονιμότερο χαρακτήρα απ' ότι στην επιφάνεια.

Υδατοϊκανότητα είναι το ποσοστό του νερού που συγκρατείται στο έδαφος ενάντια στη δύναμη της βαρύτητας ή αλλιώς το ποσοστό του νερού που συγκρατείται σε ένα έδαφος όταν μετά από βροχή ή άρδευση η προς τα κάτω κίνηση του νερού έχει σταματήσει (Κεραμίδας, 1997).

**Βλάστηση:** Η φυτοκάλυψη μειώνει την κινητική ενέργεια των βροχοσταγόνων που φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους. Η βλάστηση συντελεί στη πρόληψη της διάβρωσης γιατί βελτιώνεται η βιολογική δραστηριότητα η οποία μαζί με την οργανική ουσία, επιδρούν σημαντικά στη διηθητικότητα του εδάφους και στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων.

Επιπλέον, η ύπαρξη βλάστησης συντελεί στη μείωση της ταχύτητας του νερού απορροής αλλά και στη μείωση της υγρασίας του εδάφους λόγω της εξάτμισης, με αποτέλεσμα να εισδύει περισσότερο νερό στο έδαφος στην επόμενη βροχόπτωση. Η πυκνότητα της φυτοκάλυψης αλλά και ορισμένα χαρακτηριστικά των φυτών όπως το ύψος των φυτών, το μέγεθος και ο προσανατολισμός των φύλλων καθορίζουν το μέγεθος της ευνοϊκής επίδρασης της φυτοκάλυψης στη διάβρωση. Το ριζικό σύστημα των φυτών πολύ συχνά στηρίζει και σταθεροποιεί το έδαφος σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος και επομένως αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα αντιδιαβρωτικής προστασίας (Παναγιωτόπουλος, 2008).

**Ανθρώπινος παράγοντας:** Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που συμβάλλουν στο φαινόμενο της διάβρωσης είναι α. οι δασικές πυρκαγιές β. η υπερβόσκηση γ. η μετατροπή δασικών εκτάσεων σε γεωργικές δ. η απομάκρυνση ή καύση των φυτικών υπολειμμάτων ε. η μηχανική κατεργασία κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης της επιφάνειας, η οποία επιταχύνει την επιφανειακή απορροή. Η διάβρωση του εδάφους από τις καλλιεργούμενες εκτάσεις είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από αυτή στις ακαλλιεργήτες (Brown, 1984).

## ***2.2 Η μοντελοποίηση της διάβρωσης***

Η ανάγκη της διαχείρισης του περιβάλλοντος, καθώς και η ανάγκη της πρόβλεψης των αλλαγών που θα συμβούν στο μέλλον, μέσω των διαχειριστικών πρακτικών των ανθρώπων, οδήγησε το επιστημονικό ενδιαφέρον στη μελέτη των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα και τη συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων με σκοπό τη μοντελοποίηση των διεργασιών αυτών (Συλλαίος κα, 2007).

Η μοντελοποίηση της διάβρωσης είναι η διαδικασία της μαθηματικής περιγραφής της απόσπασης των εδαφικών σωματιδίων, της μεταφοράς και της απόθεσής τους σε άλλες τοποθεσίες (Nearing et al., 1994). Στόχος των μοντέλων διάβρωσης είναι να εκφράσουν τους κύριους μηχανισμούς που ελέγχουν τη διάβρωση συμπεριλαμβανομένων και των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα τους. Γενικά, η αξία των μοντέλων διάβρωσης έγκειται κυρίως στην χρησιμότητά τους ως εργαλεία πρόβλεψης για την εκτίμηση της απώλειας εδάφους, για την ανάπτυξη σχεδίων συντήρησης και ολοένα και περισσότερο για τον καθορισμό κατευθυντήριων γραμμών για την αντιμετώπιση της διάβρωσης με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων (Croke et al., 2006). Επίσης, παρέχουν έναν ποσοτικό προσδιορισμό της απώλειας εδάφους και εκτιμούν τον βαθμό υποβάθμισης του.

Οι πρώτες προσπάθειες υπολογισμού του κινδύνου διάβρωσης ξεκίνησαν από τον Zing (1940) σε μικρές κεκλιμένες επιφάνειες πλαγιών και αγρούς, ο οποίος συσχέτισε το βαθμό διάβρωσης με την κλίση του εδάφους και το μήκος κλίσης. Ο Smith (1958) έλαβε υπόψη του τους παράγοντες της φυτοκάλυψης, τα αντιδιαβρωτικά μέτρα και τη διαβρωσιμότητα των εδαφών, ενώ οι Wischmeier και Smith (1962) αναφέρθηκαν στους κλιματικούς παράγοντες ως παράγοντες διαβρωτικότητας της βροχής R και εισήγαγαν την Universal Soil Loss Equation (USLE), η οποία ακόμα και σήμερα αποτελεί τη βασική φιλοσοφία κάθε προσέγγισης που αφορά τη διάβρωση.

Για την περιγραφή και την πρόβλεψη του κινδύνου του φαινομένου της διάβρωσης έχουν αναπτυχθεί πολλές εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις. Ωστόσο, δεν υπάρχει

ακόμα κάποια σχέση κατάλληλη για όλες τις περιπτώσεις και το γεγονός αυτό δημιουργεί διαφωνίες ως προς την μορφή της κάθε εξίσωσης που καλείται να περιγράψει την επίδραση του κάθε παράγοντα στο φαινόμενο της διάβρωσης.

Με την πάροδο των χρόνων, έχει σημειωθεί αξιοσημείωτη έρευνα και ανάπτυξη σε μια σειρά από κατάλληλα μοντέλα διάβρωσης για την εκτίμηση της απώλειας εδάφους. Τέτοια μοντέλα ποικίλουν ως προς το πεδίο εφαρμογής, από σχετικά απλά εμπειρικά μοντέλα ή παραμετρικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται κυρίως στην παρατήρηση και τις στατιστικές συσχετίσεις, μέχρι τα ντετερμινιστικά (προσδιοριστικά) μοντέλα. Τα μοντέλα διαφέρουν επίσης σε ότι αφορά τη πολυπλοκότητα, τις διαδικασίες που λαμβάνονται υπόψη καθώς και τα δεδομένα που απαιτούνται για τη χρήση του κάθε μοντέλου.

Τα περισσότερα μοντέλα για την διάβρωση αναπτύχθηκαν σε πειραματικές επιφάνειες, κάτι που σημαίνει ότι σχεδιάστηκαν για να παρέχουν σημειακές εκτιμήσεις απώλειας εδάφους. Όταν τα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται σε ευρύτερες περιοχές, τα αποτελέσματα που προκύπτουν πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή. Αν ένα μοντέλο είναι σχεδιασμένο για την εκτίμηση απώλειας εδάφους σε μία πειραματική επιφάνεια δεν μπορεί να παράγει ορθές εκτιμήσεις όταν εφαρμόζεται σε περιφερειακή ή μικρότερη κλίμακα. Ακόμα, ο ερευνητής θα πρέπει να γνωρίζει ποιες ουσιαστικά διεργασίες της διάβρωσης έχουν μοντελοποιηθεί.

Στο σημείο αυτό περιγράφονται τα σημαντικότερα μοντέλα πρόβλεψης της διάβρωσης και της υποβάθμισης που έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως.

1) Μοντέλο της χημικής απορροής και διάβρωσης γεωργικών συστημάτων (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Systems/ CREAM): Αξιολογεί τις γεωργικές πρακτικές αναφορικά με τη μεταφορά ρυπογόνων ουσιών του εδάφους εξαιτίας της επιφανειακής απορροής υδάτων και του εδαφικού ύδατος που διακινείται μέσω του ριζικού συστήματος. Παρόλο που το CREAM είναι ένα μοντέλο μεταφοράς ρύπων, επειδή αυτοί συνήθως αποθηκεύονται στις φερτές ύλες, θεωρείται και μοντέλο διάβρωσης (Woodward D., 1999).

2) Πρόγραμμα πρόβλεψης της υδατικής διάβρωσης (Water Erosion Prediction Project/WEPP): Βασίζεται κυρίως στις αρχές τις φυσικής για την επίδραση της σταγόνας κατά τη διάρκεια μιας βροχής, την απόσπαση του εδάφους σε χειμάρρους και στην επιφάνεια ανάμεσά τους. Βασίζεται ακόμη στις αρχές της υδραυλικής πάνω στην επιφανειακή απορροή υδάτων και της στερεομεταφοράς (Brazier R. et al 2001, Schumacher T. et al 1999).

Τα μοντέλα CREAM και WEPP συμπεριλαμβάνουν μεταβλητές εκτίμησης της απόθεσης υλικών, όταν η ποσότητα των φερτών υλών που διαβρώνεται ξεπερνά την ικανότητα μεταφοράς στερεών της επιφανειακής απορροής υδάτων . (Evans R. 2002, Kinnell P. 2008, Renschler C. 2002)

3) Ευρωπαϊκό μοντέλο εδαφικής διάβρωσης (European Soil Erosion Model/ EUROSEM): Υπολογίζεται με τη βοήθεια ακραίων χειμαρρικών φαινομένων σε μικρές επιφάνειες ή πολύ μικρές λεκάνες απορροής προσομοιώνοντας τον τρόπο που τα ύδατα και οι φερτές ύλες κινούνται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους (De Vente J. et al 2006, Folly A. et al 1999, Kinnell P. 2004)

4) Γεωργικό μη σημειακών πηγών μοντέλο (Agricultural Nonpoint Source/ AGNPS): Προσδιοριστικό μοντέλο που έχει ως στόχο την πρόβλεψη της ποσότητας και ποιότητας της επιφανειακής απορροής, αλλά και τη διακίνηση φερτών υλών και χημικών ουσιών ως αποτέλεσμα γεωργικών πρακτικών (Grunwald S. 1999, Lenzi M. 1997, Rode M. 1999, Zhang L. 1996).

5) Γενική εξίσωση της εδαφικής διάβρωσης (Universal Soil Loss Equation/ USLE): Πρόκειται για το πιο διαδεδομένο μοντέλο πρόβλεψης, το οποίο αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ με τη βοήθεια 10000 δοκιμαστικών επιφανειών σε γεωργικές καλλιέργειες ήπιας κλίσης (έως 9%) από το 1932 έως το 1953 και επομένως κατατάσσεται στα εμπειρικά μοντέλα (Kinnell P. 2004, Renschler C. 2002). Εξετάζει τη συνεπίδραση του κλίματος, του εδάφους και του ανάγλυφου με τη βλάστηση. Η αναθεωρημένη γενική εξίσωση της εδαφικής διάβρωσης (Revised Universal Soil Loss Equation/ RUSLE) διατήρησε τη βασική μαθηματική δομή της ULSE, αλλά άλλαξε την τεχνολογία υπολογισμού της κάθε μεταβλητής εισάγοντας νέα δεδομένα για συγκεκριμένες συνθήκες. Η αλλαγή αυτή μετακίνησε τη ULSE από

τα στοχαστικά στα πιο προσδιοριστικά μοντέλα (Lufafa A. et al 2002, Mitasova H. 1999, Mohamed M. 2003). Το 1975 εισήχθη η τροποποιημένη γενική εξίσωση της εδαφικής διάβρωσης (Modified Universal Soil Loss Equation/ MRUSLE) η οποία μπορεί να προβλέψει την αναμενόμενη διάβρωση μετά την εκδήλωση ακραίων χειμαρρικών φαινομένων σε λοφώδεις εκτάσεις (Kinnell P., 2008). Οι ULSE, RUSLE και MRUSLE έχουν εφαρμοστεί κατά κόρον σε διάφορα μέρη της γης παρά τους περιορισμούς εφαρμογής τους.

6) Μοντέλο δυναμικού διάβρωσης του Gravrilovic (Gravrilovic Erosion Potential Method): Ημι-ποσοτικό μοντέλο διάβρωσης και υποβάθμισης, το οποίο αναπτύχθηκε μετά από εργασίες υπαίθρου σε ορεινές λεκάνες απορροής του ποταμού Μαράβα της Σερβίας και οι οποίες ενισχύθηκαν με εργαστηριακές εργασίες, προκειμένου να προσδιοριστεί επακριβώς το εύρος τιμών κάθε μεταβλητής (Gravrilovic S., 1976)

### ***2.3 Μοντελοποίηση διάβρωσης με τη βοήθεια του BSTEM***

Όπως τα άλλα μοντέλα που προαναφέρθηκαν, έτσι και το BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) -που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσης έρευνας- προσπαθεί να εκτιμήσει τη διάβρωση και την αστοχία και συγκεκριμένα στην περίπτωση των πρανών. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε τα τελευταία χρόνια σε μελέτες ανά τον κόσμο ως εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης και της αστοχίας των πρανών. Κάποιες ενδεικτικές μελέτες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Η λεκάνη απορροής Yazoo του ποταμού Μισισσιπή (Parkera C. et al., 2008), είναι ένα παράδειγμα ενός συστήματος που αντιμετωπίζει υπερβολική διάβρωση και αστάθεια στην όχθη του. Γενικά, οι ιδιότητες των υλικών της όχθης είναι σημαντικές για τον έλεγχο της σταθερότητας των πρανών και παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι αυτές οι ιδιότητες μεταβάλλονται συχνά χωρικά. Η εν λόγω μελέτη που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό, και έγινε στο Μισισσιπή καταδεικνύει τη σημασία που

αποδίδει η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των υλικών της όχθης για τη σταθερότητα των πρανών: τόσο σε μικρο-κλίμακα μέσα σε μια τοποθεσία, όσο και σε μεσο-κλίμακα μεταξύ περιοχών μελέτης. Τα υλικά του πρανούς σε αυτήν την περιοχή μελέτης ήταν: 1-2 μέτρα μετρίως συνεκτική καφέ αργιλώδης ιλύς της Ύστερης Ολόκαινου ηλικίας (LH) και 1,50 m γκρι ιλύς, μικρής συνοχής και διαπερατότητας, της Πρώιμης Ολόκαινου. Αυτά τα δύο τμήματα χωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα ( $\sim 0,1$  m), που περιέχει μαγγάνιο και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή διαπερατότητα. Τα υλικά αυτά επικαλύπτουν περίπου 1 m άμμου και 1,50 m από άμμο και χαλίκι μαζί. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής οριοθετούνται χωρικά σε επτά διατομές της λεκάνης απορροής Υαζοο και χρονικά σε 8 εβδομάδες έρευνας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2005. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έχουν πολύ περισσότερη σημασία εκτός αυτών των περιορισμένων ορίων και μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλά θέματα που αφορούν τη σταθερότητα των πρανών, καθώς και σε κάθε μελέτη εντός της οποίας η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα είναι κρυμμένη πίσω από ντετερμινιστικά αποτελέσματα του μοντέλου. Η μελέτη δεν διαπίστωσε καμία σημαντική διαφορά μεταξύ της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων των υλικών της όχθης στη μικρο-κλίμακα και στη μεσο-κλίμακα αλλά, αντίθετα, έδειξε ότι και οι δύο επηρεάζουν σημαντικά την σταθερότητα της όχθης του ποταμού. Η μεταβλητότητα της μικρο-κλίμακας θεωρείται ότι είναι σε μεγάλο βαθμό αποτέλεσμα των εγγενών διακυμάνσεων των ιδιοτήτων του εδάφους, αν και η συμβολή των τυχαίων σφαλμάτων των δοκιμών είναι άγνωστη. Η μεταβλητότητα της μεσο-κλίμακας θεωρείται ότι είναι κατάλοιπο του ιστορικού σχεδίου απόθεσης, αν και η έλλειψη πληροφοριών περιορίζει τα ασφαλή συμπεράσματα σε αυτό.

Όταν το εύρος των παρατηρούμενων γεωτεχνικών τιμών των παραμέτρων εφαρμόστηκε σε πρανές με σκοπό να αναλύσει τη σταθερότητα του χρησιμοποιώντας το BSTEM, διαπιστώθηκε ότι η μεταβλητότητα προκαλεί αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας. Η μεταβλητότητα που παρατηρήθηκε στη μελέτη αυτή δείχνει ότι η ντετερμινιστική προσέγγιση που εφαρμόζεται σήμερα για την όχθη ποταμού είναι περιορισμένη και ότι η πιθανοκρατική προσέγγιση με τη μορφή της Monte Carlo ανάλυσης είναι πιο κατάλληλη. Επιπλέον, βρίσκονται σε εξέλιξη

προσπάθειες για τον προσδιορισμό των στατιστικών κατανομών των γεωτεχνικών παραμέτρων σε μια σειρά από τύπους υλικών, καθώς αυτό θα βοηθήσει κατά πολύ στην ευρεία αποδοχή της πιθανοκρατικής προσέγγισης. Η πρόοδος σε αυτόν τον τομέα έχει τη δυνατότητα να παρέχει σημαντικά βελτιωμένη εκτίμηση των φορτίων των ιζημάτων από την αστοχία της όχθης και ως εκ τούτου να είναι χρήσιμο εργαλείο σε ένα ευρύ φάσμα ποτάμιων εφαρμογών διαχείρισης.

Η αστοχία στις όχθες που προκαλείται από τη διάβρωση υποδηλώνει την ύπαρξη και μιας μεγάλης ποσότητας ιζήματος (Simon A. et al., 2008). Ελάχιστη ή και καμία ποσοτική πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών προκειμένου να μειωθεί η διάβρωση στις όχθες. Για να αξιολογηθεί η πιθανή μείωση των φορτίων των ιζημάτων, έγινε προσομοίωση των υδραυλικών και γεωτεχνικών διαδικασιών που είναι υπεύθυνες για την αστοχία, τόσο κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες όσο και κάτω από συνθήκες αποκατάστασης και προστασίας του ποδιού της όχθης, με τη χρήση του μοντέλου BSTEM. Στη συγκεκριμένη μελέτη, όπου και έγινε η εφαρμογή αυτού, επιλέχθηκαν δυο θέσεις (όπου παρουσιάζεται έντονο το φαινόμενο της διάβρωσης) από κάθε μια από τις τρεις λεκάνες απορροής που είναι γνωστό ότι συνεισφέρουν μεγάλη ποσότητα ιζημάτων στη λεκάνη της λίμνης Tahoe. Για την ανάλυση επιλέχθηκε ένα τυπικό υψηλής ροής ετήσιο υδρογράφημα. Τα αποτελέσματα του πρώτου γεγονότος της διάβρωσης του ποδιού προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας μία ακραία τιμή της διατμητικής τάσης. Η προκύπτουσα γεωμετρία στη συνέχεια εξήχθη στο υπομοντέλο της σταθερότητας της όχθης για να εξεταστεί η σχετική σταθερότητα της όχθης κάτω από συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ροής. Με τον τρόπο αυτό, το BSTEM χρησιμοποιήθηκε επαναληπτικά για όλα τα γεγονότα ροής και για τις υπάρχουσες συνθήκες και για τις συνθήκες προστασίας του ποδιού.

Κατά μέσο όρο, 13,6% του υλικού είχε διαβρωθεί από την υδραυλική τάση, ενώ το υπόλοιπο υπέστη αστοχία. Οι προσομοιώσεις όπου τοποθετήθηκε 1,0 m βράχος για την προστασία του ποδιού, έδειξαν μια δραματική μείωση στη διάβρωση και συγκεκριμένα κατά 69-100%. Η συχνότητα των αστοχιών για την περίοδο

προσομοίωσης μειώθηκε και στις περισσότερες περιπτώσεις σε ένα μόνο επεισόδιο. Έτσι, μια μείωση σχεδόν κατά 90% στα φορτία επετεύχθη εξαλείφοντας τη διάβρωση μόνο του 14% του υλικού που παρασύρεται από τις υδραυλικές δυνάμεις. Ως εκ τούτου, οι προσομοιώσεις έδειξαν μέση μείωση του φορτίου περίπου κατά μία τάξη μεγέθους. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν τη σημασία που έχει η προστασία της περιοχής του ποδιού της όχθης. Σε επαναληπτικές προσομοιώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε και ο παράγοντας της βλάστησης έδειξαν μείωση των φορτίων των ιζημάτων κατά 50%.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σταθερότητα πρανών**

### ***3.1 Γενικά στοιχεία***

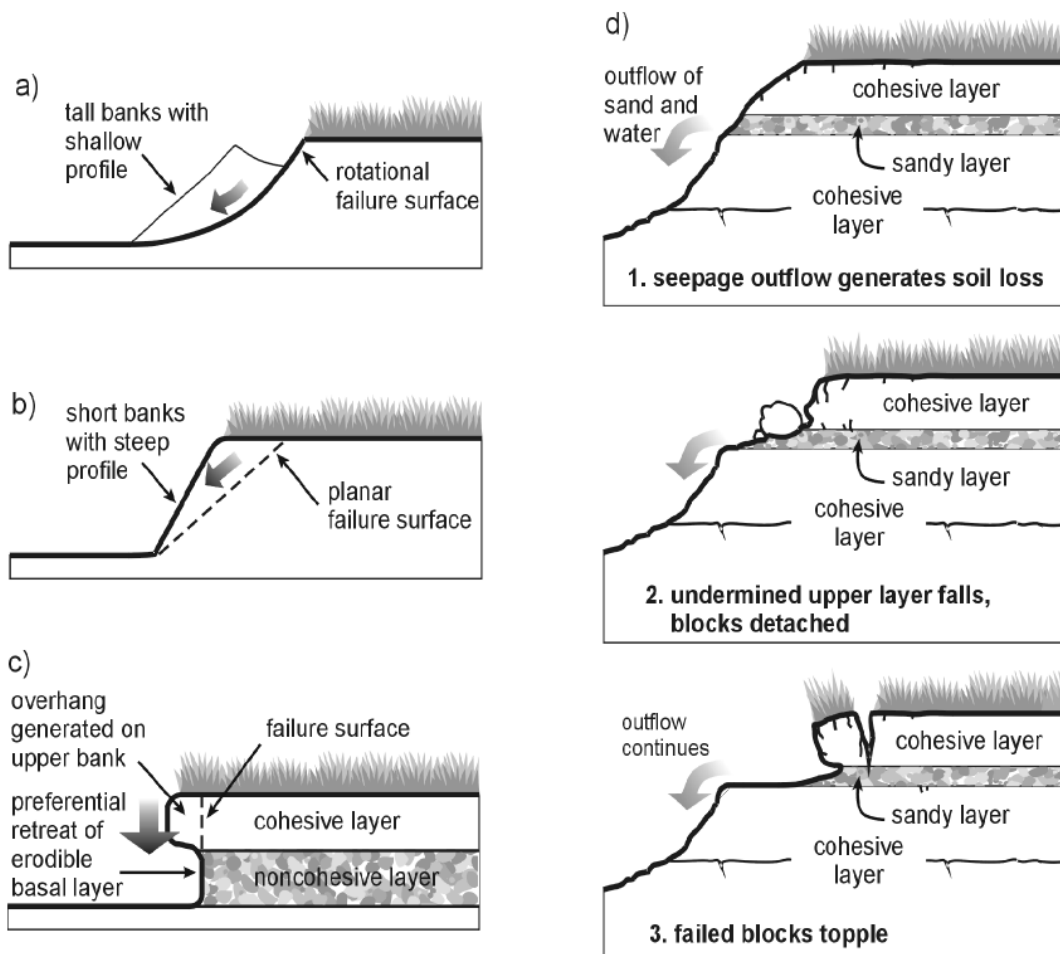
Ως πρανές ορίζεται ένας κεκλιμένος φυσικός ή τεχνητός σχηματισμός εδάφους ή βράχου. Η κλίση αυτή του πρανούς, το καθιστά «ασταθές» σε σχέση με έναν οριζόντιο σχηματισμό εδάφους, λόγω της παρουσίας διατμητικών τάσεων.

Σε ένα φυσικό πρανές η ευστάθεια δεν είναι πάντοτε εξασφαλισμένη. Το φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α. μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του φυσικού πρανούς.

Το πρανές που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά όχθη ποταμού και αστοχεί λόγω της μεταβολής της στάθμης του ποταμού και της διάβρωσης που προκαλείται από αυτήν την μεταβολή, καθώς και λόγω των πλημμυρικών γεγονότων.

### ***3.2 Τύποι αστοχίας όχθης ποταμού***

Η αστοχία του πρανούς μπορεί να εμφανιστεί με διάφορους μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των αστοχιών προβόλων ανασκαμμένων αναχωμάτων, της ανατροπής κάθετων πλακών και της περιστροφικής κατάρρευσης (Thorne et al., 1981). Ο τύπος της αστοχίας απεικονίζει το βαθμό ανασκαφής από την επίδραση ποτάμιων ή άλλων μηχανισμών υποσκαφής και τη φύση των υλικών των πρανών (Σχήμα 3.1).



**Σχήμα 3.1:** Επιλογή τύπων αστοχιών που παρατηρούνται στο πεδίο

Το μοντέλο ευστάθειας πρανών προσομοιώνει τους τύπους (β) και (γ) και μια τροποποίηση του τύπου (β) όπου μια εφελκυστική ρωγμή δημιουργείται την στιγμή της αστοχίας. Όλα αυτά είναι αστοχίες διάτμησης που εμφανίζονται όταν η δύναμη της τάση υπερβαίνει τη δύναμη αντίστασης.

### 3.3 Σταθερότητα της όχθης ποταμού

Η διατμητική τάση αστοχίας του κορεσμένου εδάφους περιγράφεται από την εξίσωση Mohr-Coulomb (Εξίσωση 1):

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \varphi' \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

Όπου:

$\tau_f$  = διατμητική τάση στην επιφάνεια αστοχίας (kPa) (soil shear strength stress)

$c'$  = ενεργός συνεκτικότητα, το αποκοπτόμενο δηλαδή τμήμα του άξονα διατμητικής αντοχής όταν η ενεργός ορθή τάση και η μύζηση είναι μηδέν (kPa) (effective cohesion)

$\sigma$  = ορθή τάση (kPa) (normal stress)

$\mu_w$  = πίεση του νερού των πόρων κατά την αστοχία (kPa) (pore-water pressure)

$\varphi'$  = ενεργός γωνία εσωτερικών τριβών (μοίρες) (effective angle of internal friction)

Η διατμητική αντοχή ενός ακόρεστου εδάφους μπορεί να διατυπωθεί με τη βοήθεια των ανεξάρτητων εντατικών μεταβλητών. Για την εξίσωση της διατμητικής αντοχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιεσδήποτε δύο από τις τρεις πιθανές μεταβλητές  $(\sigma - \mu_a)$ ,  $(\mu_a - \mu_w)$  ή  $(\sigma - \mu_w)$ . Πρακτικά αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός  $(\sigma - \mu_a)$ ,  $(\mu_a - \mu_w)$  έχει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Με χρήση των μεταβλητών αυτών η εξίσωση της διατμητικής αντοχής γράφεται (Εξίσωση 2):

$$\tau_\varphi = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Όπου:

$(\sigma - \mu_a)$  = καθαρή ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας

$(\mu_a - \mu_w)$  = matric μύζηση στην επιφάνεια αστοχίας

$\varphi^b$  = γωνία που δείχνει τον ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την matric μύζηση.

### 3.4 Αλγόριθμοι σταθερότητας όχθης ποταμού

#### 3.4.1 Οριζόντια στρώματα

Η μέθοδος οριζόντιων στρωμάτων είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη του τύπου αστοχίας σφηνών που αναπτύχθηκε από τους Simon και Curini (1998) και Simon et al (2000). Το μοντέλο είναι μια ανάλυση ισορροπίας ορίου στην οποία το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb χρησιμοποιείται για το κορεσμένο τμήμα της σφήνας και το κριτήριο Fredlund et Al (1978) χρησιμοποιείται για το ακόρεστο τμήμα. Εκτός από τη θετική και αρνητική πίεση πόρων-ύδατος, το πρότυπο ενσωματώνει στρωματοποίηση του εδάφους, αλλαγές στο μοναδιαίο βάρος του εδάφους σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία αλλά και την εξωτερική πίεση περιορισμού. Το μοντέλο διαιρεί το προφίλ του πρανούς σε στρώματα, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη, με μοναδικές γεωτεχνικές ιδιότητες. Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από:

$$FS = \frac{\sum Ci' Li + (Si \tan \phi_i^b) + [Wi \cos \beta - Ui + Pi \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi_i'}{\sum Wi \sin \beta - Pi \sin(\alpha - \beta)} \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Όπου:

$FS$ : ο συντελεστής ασφαλείας (*Factor of safety*)

$c_i'$  : η ενεργή συνοχή του υλικού του  $i$ -οστού στρώματος της όχθης (kPa)  
(*effective cohesion*)

$Li$ : το μήκος του επιπέδου αστοχίας μέσα στο  $i$ -οστό στρώμα της όχθης (m)

$Si$ : η δύναμη που παράγεται από την μύζηση στο ακόρεστο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας (kN/m)

$\phi_i^b$  : ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής τάσης λόγω της απορρόφησης στο υλικό του κάθε τμήματος της όχθης

$Wi$ : το βάρος του  $i$ -οστού στρώματος της όχθης (kN)

$\beta$ : η γωνία κλίσης του επιπέδου αστοχίας (μοίρες) (*failure-plane angle*)

$Ui$ : η υδροστατική δύναμη άνωσης στο κορεσμένο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας (kN/m)

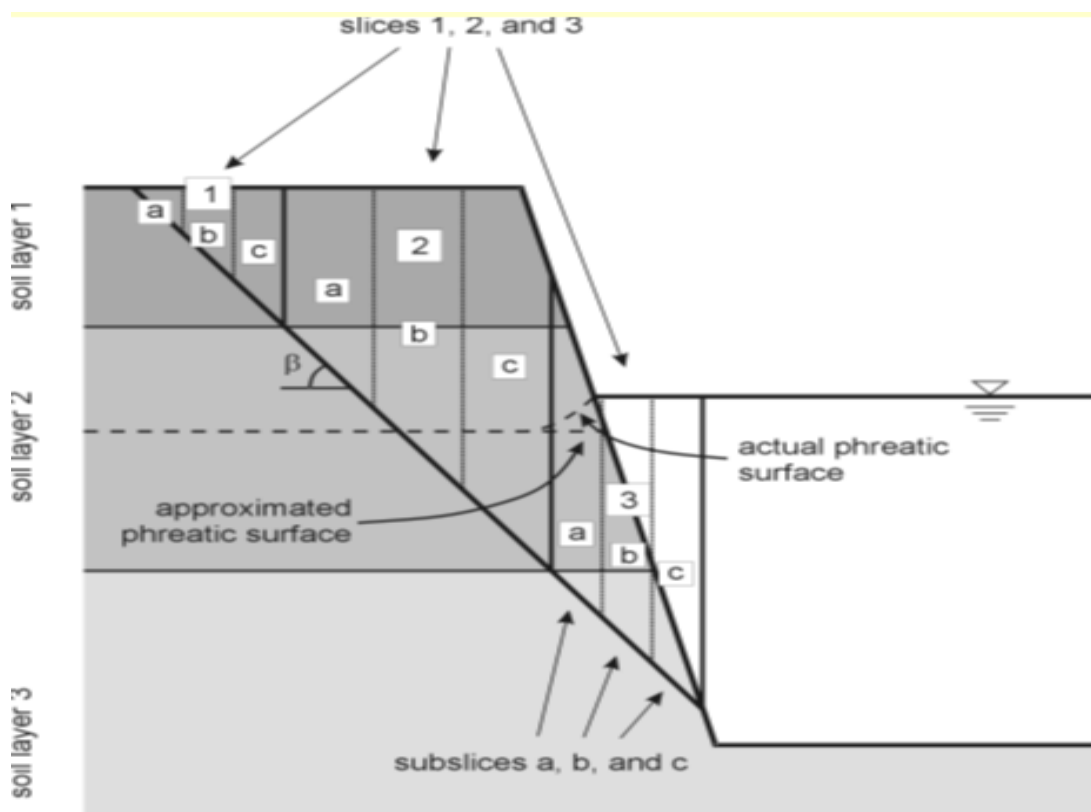
$P_i$ : η υδροστατική πίεση λόγω της στάθμης του νερού ( $kN/m$ ) (hydrostatic-confining force due to external water level)

$\alpha$ : η γωνία κλίσης της όχθης (μοίρες)(local bank angle)

$\phi'$ : η γωνία τριβής του υλικού που συμπεριλαμβάνεται σε κάθε τμήμα

### 3.4.2 Κατακόρυφες λωρίδες

Η μέθοδος των κατακόρυφων λωρίδων είναι μια προσαρμογή της μεθόδου που εφαρμόστηκε στο μοντέλο CONCEPTS (Langendoen, 2000). Όπως και στη μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, ακολουθείται η ανάλυση οριακής ισορροπίας. Εκτός από τις δυνάμεις που ενσωματώνονται στη μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, η μέθοδος κάθετων κομματιών υπολογίζει τις κανονικές και ενεργές δυνάμεις διάτμησης στα τμήματα αστοχίας. Στο Σχήμα 3.2 βλέπουμε πως γίνεται η διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια. Το πρανές χωρίζεται σε κάθετα κομμάτια στα οποία υπάρχει ένας ίσος αριθμός  $J$  κομματιών και στρωμάτων.



Σχήμα 3.2: Διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια

Κάθε κομμάτι υποδιαιρείται έπειτα σε τρία ακόμη κομμάτια ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών του  $F_s$ . Ο υπολογισμός του  $F_s$  είναι μια επαναληπτική διαδικασία τεσσάρων βημάτων: (1) οι κάθετες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την κανονική δύναμη που επιδρά στη βάση ενός κομματιού,  $N_j$  (2) οι οριζόντιες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την ορθή δύναμη διεπιφάνειας  $I_{nj}$ , (3) η διατμητική δύναμη διεπιφάνειας,  $I_{sj}$  υπολογίζεται από το  $I_{nj}$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Morgenstern και Price (1965) και (4) οι οριζόντιες δυνάμεις αθροίζονται σε όλα τα κομμάτια για να υπολογιστεί το  $F_s$ .

Κατά την πρώτη επανάληψη, η ορθή και διατμητική δύναμη διεπιφάνειας αγνοούνται και η ορθή δύναμη  $N_j$  ισούται με:

$$N_j = \frac{W_j}{\cos\beta} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Όπου

$W_j$ : το βάρος του  $j$ -οστού κομματιού.

Η πρώτη επανάληψη δίνει το συνηθισμένο  $F_s$ . Οι ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας (Εξίσωση 4) καθορίζονται από:

$$I_{nj} = I_{nj-1} - \left( c'_j L_j + S_j \tan \varphi_j^b - U_j \tan \varphi'_j \right) \frac{\cos\beta}{F_s} + N_j \left( \sin\beta - \frac{\cos\beta \tan \varphi'_j}{F_s} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

και οι διατμητικές δυνάμεις διεπιφάνειας (Εξίσωση 5) καθορίζονται από:

$$I_{sj} = 0,4 I_{nj} \sin\left(\frac{\pi L_j}{\Sigma L_j}\right) \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Μετά την πρώτη επανάληψη, η ορθή δύναμη,  $N_j$  ισούται με:

$$N_j = \frac{W_j + I_{sj-1} - I_{sj} - \sin\beta \left( \frac{c'_j L_j + S_j \tan\phi_j^b - U_j \tan\phi'_j}{F_s} \right)}{\cos\beta + \frac{\tan\phi'_j \sin\beta}{F_s}} \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Αυτό ολοκληρώνει τη δεύτερη επανάληψη. Συχνά, οι υπολογισμένες ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας είναι αρνητικές (εφελκυσμός) κοντά στην κορυφή του τμήματος αστοχίας. Δεδομένου ότι το έδαφος είναι ανίκανο να αντισταθεί στις μεγάλες εκτατές πιέσεις, υποτίθεται ότι διαμορφώνεται μια εφελκυστική ρωγμή στο τελευταίο όριο διεπιφάνειας με τον εφελκυσμό. Ο συντελεστής ασφάλειας (Εξίσωση 7) καθορίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση για κάθε κομμάτι και στην οριζόντια διεύθυνση σε ολόκληρο το τμήμα αστοχίας.

$$F_s = \frac{\cos\beta \sum_{j=1}^j (c'_j L_j + S_j \tan\phi_j^b + [N_j - U_j] \tan\phi'_j)}{\sin\beta \sum_{j=1}^j (N_j) - P_j} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Το μοντέλο συνεχίζει τις επαναλήψεις έως ότου η τιμή του  $F_s$  συγκλίνει.

### 3.4.3 Διατμητική αστοχία προβόλου

Ο αλγόριθμος διατμητικής αστοχίας προβόλου είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου που υιοθετείται στο πρότυπο CONCEPTS (Langendoen, 2000). Με απλά λόγια, ο συντελεστής ασφάλειας  $F_s$  είναι ίσο με την αναλογία της διατμητικής τάσης αστοχίας του εδάφους προς το βάρος του προβόλου. Εάν η όχθη είναι κατακλυσμένη τότε το βάρος των στρωμάτων που επηρεάζονται από το νερό μειώνεται στο κατακλυσμένο βάρος τους. Με αυτή την μέθοδο, η κάθετη υδροστατική παράπλευρη δύναμη περιλαμβάνεται στον υπολογισμό. Ο  $F_s$  δίνεται από:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + S_i \tan\phi_i^b - U_i \tan\phi'_i)}{\sum_{i=1}^I (W_i - P_i)} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

### 3.4.4 Σταθερότητα όχθης βάσει του συντελεστή ασφαλείας

Η επίδραση της διάβρωσης του ποδίου και κάποια μέτρα για την προστασία των οχθών που ενδέχεται να ληφθούν σε περίπτωση αστοχίας, απαιτούν τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ) της όχθης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς τις κινητήριες δυνάμεις. Στις δυνάμεις αντίστασης ανήκει η δύναμη του εδάφους, η βλάστηση κ.α. ενώ στις κινητήριες δυνάμεις η γωνία και το κέντρο βάρους της όχθης καθώς επίσης και η στάθμη του νερού.

Οι παράμετροι αυτές που ανήκουν είτε στις κινητήριες είτε στις δυνάμεις αντίστασης, και σχετίζονται άμεσα με το μοντέλο διάβρωσης και το μοντέλο σταθερότητας της όχθης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1).

**Πίνακας 3.1:** Περιγραφή κινητήριων δυνάμεων και δυνάμεων αντίστασης

| <i>Toe Erosion Model</i>          |                                      | <i>Bank Stability Model</i>        |                              |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| <i>(υδραυλικά χαρακτηριστικά)</i> |                                      | <i>(γεωτεχνικά χαρακτηριστικά)</i> |                              |
| <i>Κινητήριες</i>                 | <i>Δυνάμεις</i>                      | <i>Κινητήριες</i>                  | <i>Δυνάμεις</i>              |
| <i>δυνάμεις</i>                   | <i>αντίστασης</i>                    | <i>δυνάμεις</i>                    | <i>αντίστασης</i>            |
| Κλίση καναλιού                    | Κρίσιμη διατμητική τάση ( $\tau_c$ ) | Ύψος όχθης                         | Ενεργή συνοχή ( $c'$ )       |
| Διάρκεια ροής                     | Συντελεστής διάβρωσης ( $k$ )        | Γωνία όχθης                        | Γωνία τριβής ( $\phi$ )      |
|                                   |                                      | Φαινόμενο βάρος ( $\gamma$ )       | Φαινόμενο βάρος ( $\gamma$ ) |
|                                   |                                      | Πίεση νερού πόρων ( $\mu$ )        | Βλάστηση                     |
|                                   |                                      |                                    | Matric μύζηση( $\mu$ )       |

### 3.5 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού (Toe Erosion Model)

#### 3.5.1 Υπολογισμός μέσης οριακής διατμητικής τάσης ( $\tau_o$ )

Η μέση οριακή διατμητική τάση (Εξίσωση 9) που ενεργεί σε κάθε κόμβο του υλικού της όχθης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_o = \gamma_w R S \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

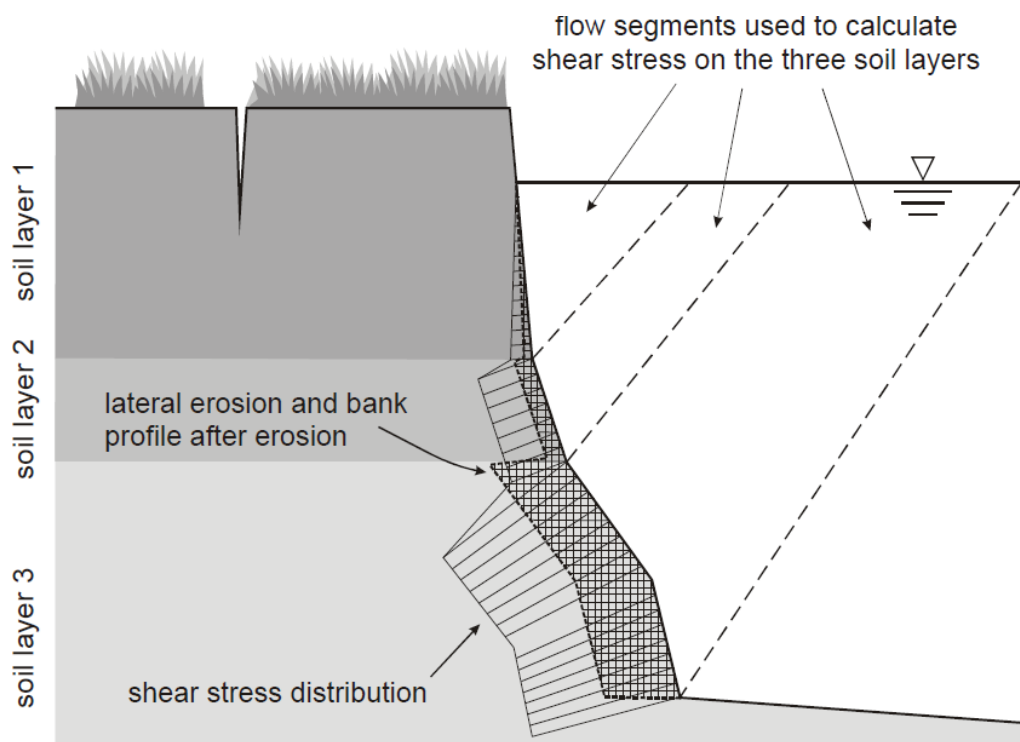
Όπου:

$\tau_o$  = μέση οριακή διατμητική τάση (Pa) (average boundary shear stress) ,

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος νερού ( $9,81 \text{ kN/m}^3$ ) (unit weight of water),

$R$  = τοπική υδραυλική ακτίνα (m) (που υπολογίζεται από το βάθος ύδατος) (local hydraulic radius) και

$S$  = κλίση καναλιού (m/m) (channel slope)



Σχήμα 3.3: Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής και υδραυλικών ακτίνων

Η μέση οριακή διατμητική τάση που ασκείται από τη ροή σε κάθε κόμβο καθορίζεται με τη διαίρεση της περιοχής ροής σε τμήματα που επηρεάζονται μόνο από την τραχύτητα της όχθης και έπειτα με την περαιτέρω υποδιαίρεση για να καθοριστεί η περιοχή ροής που επηρεάζεται από την τραχύτητα του κάθε κόμβου. Η γραμμή που διαιρεί τα τμήματα της όχθης που επηρεάζονται υποτίθεται ότι διχοτομούν τη μέση γωνία της όχθης και την μέση γωνία του ποδιού (Σχήμα 3.3). Η υδραυλική ακτίνα της ροής σε κάθε τμήμα είναι η περιοχή του τμήματος ( $A$ ) που διαιρείται με τη περιβρεχόμενη περίμετρο του τμήματος ( $P_n$ ). Η διατμητική τάση του υγρού σύμφωνα με τις διαχωριστικές γραμμές δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό της περιβρεχόμενης περιμέτρου.

### ***3.5.2 Συντελεστής διάβρωσης και κρίσιμη διατμητική τάση***

Μια συσκευή jet-test έχει αναπτυχθεί από τον Hanson (1990) για να διεξάγει επιτόπιες δοκιμές διάβρωσης εδάφους. Αυτή η συσκευή έχει αναπτυχθεί και βασίστηκε στη γνώση των υδραυλικών χαρακτηριστικών ενός jet και των χαρακτηριστικών της διάβρωσης του εδαφικού υλικού. Χρησιμοποιώντας αυτήν την συσκευή, οι Hanson και Simon (2001) ανέπτυξαν την ακόλουθη σχέση μεταξύ της κρίσιμης διατμητικής τάσης ( $\tau_c$ ) και του συντελεστή διάβρωσης ( $k$ ) (Εξίσωση 10) για συνεκτική ιλύ και άργιλο:

$$k = 2 * 10^{-7} * \tau_c^{-0,5} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

### 3.5.3 Ποσοστά και ποσά διάβρωσης

Ένας μέσος ρυθμός διάβρωσης (σε m/s) υπολογίζεται για κάθε κόμβο με τη χρήση μιας προσέγγισης ακραίας διατμητικής τάσης (Partheniades, 1965). Αυτός ο ρυθμός έπειτα ολοκληρώνεται σε σχέση με τον χρόνο ώστε να παραχθεί μια μέση απόσταση διάβρωσης (m) (Εξίσωση 11):

$$E = k * \Delta t * (\tau_o - \tau_c) \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Όπου:

$E$  = απόσταση διάβρωσης (m) (erosion distance),

$k$  = συντελεστής διάβρωσης ( $m^3/Ns$ ) (erodibility coefficient),

$\Delta t$  = χρονικό βήμα (s) (time step),

$\tau_o$  = μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας (Pa) (average boundary shear stress) και

$\tau_c$  = κρίσιμη διατμητική αντοχή (Pa) (critical shear stress)

Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με αυτήν που υιοθετείται στο μοντέλο CONCEPTS (Langendoen, 2000) εκτός από το ότι η διάβρωση υποτίθεται ότι εμφανίζεται κανονικά στην τοπική γωνία της όχθης και όχι οριζόντια.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή μοντέλου BSTEM**

Το BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) αποτελεί ένα μοντέλο που αντιπροσωπεύει δύο διαφορετικές διαδικασίες: την αστοχία ενός τμήματος του εδάφους μεταβλητούς γεωμετρίας και τη διάβρωση της όχθης ποταμού λόγω της ροής του νερού. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης της όχθης ποταμού και προορίζεται κυρίως για χρήση σε μελέτες όπου η διάβρωση «απειλεί» τη σταθερότητα των οχθών.

Το εν λόγω μοντέλο (BSTEM) αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ιζηματοποίησης (National Sedimentation Laboratory) του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (US Department of Agriculture) με σκοπό την πρόγνωση της διάβρωσης των ποταμών (Toe Erosion Model) και της γεωτεχνικής αστοχίας (Bank Stability Model). Λίγες -εάν υπάρχουν-, αξιολογήσεις του μοντέλου έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα.

### ***4.1 Μοντέλο Σταθερότητας της Όχθης (Bank Stability Model)***

Το μοντέλο σταθερότητας της όχθης συνδυάζει τρία μοντέλα τα οποία υπολογίζουν τον συντελεστή ασφάλειας ( $F_s$ ) για πολυστρωματικά πρηνή ποταμών. Οι μέθοδοι προσομοίωσης είναι οριζόντια στρώματα (Simon et al., 2000), κάθετα κομμάτια με τάση θραύσης (Morgenstern and Price, 1965) και αστοχίες προβόλων (Thorne and Tovey, 1981). Το μοντέλο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να ενσωματώσει τα αποτελέσματα γεωυφασμάτων ή άλλων μέτρων σταθεροποίησης πρηνών που έχουν επιπτώσεις στην εδαφική αντοχή.

Το μοντέλο ερμηνεύει την αντοχή μέχρι πέντε εδαφολογικών στρωμάτων, την επίδραση της πίεσης πόρου-ύδατος (θετική και αρνητική (μύζηση μήτρας)), την περιοριστική πίεση λόγω της ροής του ποταμού και της εδαφικής ενίσχυσης και επιφόρτισης λόγω της βλάστησης.

Στο μοντέλο, με λίγα λόγια, εισάγουμε τις συντεταγμένες της όχθης (Input Geometry) και τρέχουμε τη μακροεντολή γεωμετρίας για να δημιουργήσουμε το

προφίλ του πρανούς, και κατόπιν εισάγουμε τους εδαφολογικούς τύπους, τη φυτοκάλυψη και τις πιέσεις πόρου-ύδατος (Bank Material, Bank Vegetation and Protection και Bank Model Output) για να βρούμε το  $F_s$ .

Το πρανές είναι σταθερό εάν το  $F_s$  είναι μεγαλύτερο από 1,3, ώστε να παρέχει ένα περιθώριο ασφάλειας για αβέβαια ή μεταβλητά στοιχεία. Τα πρανή με τιμή  $F_s$  μεταξύ 1,0 και 1,3 θεωρούνται "υπό όρους σταθερά", δηλ. σταθερά αλλά με λίγο περιθώριο ασφάλειας. Τα πρανή με τιμή  $F_s$  λιγότερο από 1,0 είναι ασταθή. Αυτή η έκδοση του μοντέλου υποθέτει υδροστατικές συνθήκες κάτω από τη στάθμη του νερού, και γραμμική παρεμβολή της μύζησης επάνω από τη στάθμη νερού (εκτός αν χρησιμοποιούνται τα στοιχεία πίεσης πόρου-ύδατος του χρήστη).

Το μοντέλο μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει τα κατ' εκτίμηση δεδομένα εισόδου όπου κανένα στοιχείο πεδίου δεν είναι διαθέσιμο ή ως πρώτη λύση, είτε μπορεί να ρυθμιστεί να χρησιμοποιήσει τα στοιχεία του χρήστη. Τα δεδομένα του χρήστη μπορούν να προστεθούν στα άσπρα κιβώτια.

#### ***4.2 Μοντέλο Διάβρωσης Ποδιού της όχθης (Toe Erosion Model)***

Το μοντέλο διάβρωσης του ποδιού του πρανούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης του πρανούς και του ποδιού του πρανούς από την υδραυλική διατμητική τάση. Τα αποτελέσματα της προστασίας από τη διάβρωση στο πρανές και το πόδι του μπορούν να ενσωματωθούν για να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα των μέτρων ελέγχου διάβρωσης.

Το πρότυπο υπολογίζει την οριακή διατμητική τάση από τη γεωμετρία του καναλιού, και θεωρεί την κρίσιμη διατμητική τάση και το συντελεστή διάβρωσης σε δύο χωριστές ζώνες με ενδεχομένως διαφορετικά υλικά, το πρανές και το πόδι του πρανούς.

Αυτό είναι επειδή το μοντέλο υποθέτει ότι η διάβρωση δεν είναι περιορισμένη μεταφορά και δεν ενσωματώνει, σε καμία περίπτωση, προσομοίωση μεταφοράς ιζημάτων.

Εισάγουμε τις συντεταγμένες του πρानού, τις παραμέτρους της ροής και την κλίση του καναλιού (*Input Geometry*), εισάγουμε έπειτα τους τύπους υλικών του πρानού και του ποδιού του πρानού και ενδεχομένως την προστασία έναντι διάβρωσης (*Bank Material, Bank Vegetation and Protection* και *Toe Model Output*). Έπειτα, τρέχουμε τη μακροεντολή διατμητικής τάσης για να καθορίσουμε πόση διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου γεγονότος καταιγίδας.

### 4.3 Δομή του μοντέλου

Το μοντέλο είναι ουσιαστικά ένα αρχείο *excel* το οποίο αποτελείται από 8 φύλλα εργασίας:

1. Εισαγωγική καρτέλα, η οποία περιλαμβάνει ένα γενικό θεωρητικό υπόβαθρο.
2. Καρτέλα τεχνικού υπόβαθρου, η οποία παρέχει τις εξισώσεις για την ανάλυση ευστάθειας οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρνητικές και θετικές πιέσεις πόρων-ύδατος, τις επιδράσεις της βλάστησης και τέλος μια εισαγωγή για την διάβρωση του ποδιού.
3. Καρτέλα χρήσης του μοντέλου και συχνών ερωτήσεων, η οποία περιλαμβάνει την μεθοδολογία για την εφαρμογή των χαρακτηριστικών του μοντέλου, συμπεριλαμβάνοντας και κάποιες αναφορές σχετικές με την γεωμετρία των πρानών, την επιλογή της διατμητικής επιφάνειας, τα στρώματα του εδάφους, τη στάθμη του υδροφορέα από την επιφάνεια, τη βλάστηση και τη διάβρωση του ποδιού.
4. Καρτέλα εισαγωγής της γεωμετρίας (*Input Geometry*), στην οποία εισάγουμε τις συντεταγμένες για το προφίλ της όχθης (πρανές), το πάχος του στρώματος της όχθης, και τις παραμέτρους ροής.
5. Καρτέλα εισαγωγής του υλικού της όχθης (*Bank Material*), στην οποία εισάγουμε δεδομένα για το υλικό των στρωμάτων της όχθης, και για τη διαβρωσιμότητα του ποδιού του πρानού με σκοπό τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης και του συντελεστή διάβρωσης.
6. Καρτέλα εισαγωγής της βλάστησης (*Bank Vegetation and Protection*), στην οποία εισάγουμε το είδος της παρόχθιας βλάστησης και κάποια χαρακτηριστικά αυτής.

7. Καρτέλα αποτελεσμάτων του μοντέλου (Bank Model Output), στην οποία εισάγουμε τη στάθμη του υδροφορέα και λαμβάνουμε αποτελέσματα που σχετίζονται με την αστοχία της όχθης.
8. Άλλη μία καρτέλα αποτελεσμάτων του μοντέλου (Toe Model Output), από την οποία λαμβάνουμε αποτελέσματα που σχετίζονται με τη διάβρωση του ποδιού της όχθης του ποταμού.

#### ***4.4 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου***

##### **Βήμα 1:**

Το πρώτο πράγμα που συναντούμε ανοίγοντας το excel, είναι το φύλλο της εισαγωγής όπου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορούμε να βρούμε διάφορες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο.

##### **Βήμα2:**

Μεταβαίνουμε στην καρτέλα εισαγωγής της γεωμετρίας (Καρτέλα: Input Geometry). Αρχικά επιλέγουμε την επιλογή B για τη γεωμετρία του πρανού. Το εν λόγω μοντέλο απαιτεί την εισαγωγή της γεωμετρίας της όχθης δηλαδή τις συντεταγμένες της όχθης καθώς και κάποιες παραμέτρους της ροής και των καναλιών. Όσον αφορά τη γεωμετρία της όχθης γίνεται εισαγωγή του ύψους και της γωνίας αυτής, του μήκους και της γωνίας του ποδιού της όχθης καθώς επίσης και του ύψους του κάθε τμήματος της όχθης (βάσει του τρόπου με τον οποίο χωρίστηκε, δηλαδή ανάλογα με το υλικό της).

Επιπροσθέτως όσον αφορά τις παραμέτρους του καναλιού και της ροής, απαιτείται η εισαγωγή του μήκους του καναλιού, της κλίσης αυτού, της στάθμης του νερού και της διάρκειας της ροής. Πιο συγκεκριμένα, η στάθμη του νερού και η διάρκεια της ροής εκτιμάται βάσει ενός πλημμυρικού φαινομένου και συγκεκριμένα επιλέγεται η μέγιστη στάθμη κατά τη διάρκεια των ημερών όπου η δύναμη της ροής (stream power  $w$ ) παίρνει τις μέγιστες τιμές. Η δύναμη της ροής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τις παροχές.

Στο σημείο αυτό θα μπορούσαμε να αναφέρουμε πως το μήκος του καναλιού χρησιμοποιείται από το μοντέλο ως παράμετρος για τον υπολογισμό του φορτίου του ιζήματος που εισάγεται στο ποτάμι. Η διάρκεια της ροής χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της διάβρωσης που προκαλείται από τη ροή του νερού. Η στάθμη του νερού χρησιμοποιείται από το μοντέλο της σταθερότητας της όχθης για τον υπολογισμό της πίεσης του νερού, ενώ από το μοντέλο της διάβρωσης για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης. Για την εκτίμηση της διατμητικής τάσης λαμβάνεται υπόψη και η κλίση του καναλιού.

**Input bank geometry and flow conditions**

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.

2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers).

3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount, otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

**Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below**

☐ Option A

| Point | Station (m) | Elevation (m) | Top of toe?              |
|-------|-------------|---------------|--------------------------|
| A     | -19.59      | 10.00         | <input type="checkbox"/> |
| B     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| C     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| D     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| E     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| F     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| G     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| H     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| I     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| J     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| L     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| M     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| N     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| O     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| P     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| Q     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| R     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| S     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| T     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| U     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| V     |             |               | <input type="checkbox"/> |
| W     |             |               | <input type="checkbox"/> |

Shear emergence elev

Shear surface angle

**Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile**

☒ Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Input shear surface angle

**Bank layer thickness (m)**

| Layer   | Thickness (m)                     | Elevation of layer base (m) |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Layer 1 | <input type="text" value="2.00"/> | 8.00                        |
| Layer 2 | <input type="text" value="2.00"/> | 6.00                        |
| Layer 3 | <input type="text" value="2.00"/> | 4.00                        |
| Layer 4 | <input type="text" value="2.00"/> | 2.00                        |
| Layer 5 | <input type="text" value="2.00"/> | 0.00                        |

Top Layer (m)

Bottom Layer

Parallel layers, starting from point B

**Channel and flow parameters**

Input reach length (m)

Input reach slope (m/m)

Input elevation of flow (m)

Input duration of flow (hrs)

**View Bank Geometry**

**Run Bank Geometry Macro**

**Definition of points used in bank profile**

A - bank top: place beyond start of shear surface  
B - bank edge  
C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)  
Q - top of bank toe  
R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)  
V - base of bank toe  
W - end point (typically mid point of channel)

**Notes:**  
Bank profile may overhang. If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and Q. The shear surface emergence point must be unique or an error message will display.

### Βήμα 3:

Αφού έχουμε εισάγει όλα τα δεδομένα στο φύλλο γεωμετρίας, επιλέγουμε να προβληθεί η γεωμετρία της όχθης και τρέχουμε τη μακροεντολή της γεωμετρίας του πρσανούς.

**Βήμα 4:**

Έχοντας ολοκληρώσει το προηγούμενο βήμα το μοντέλο μας μεταβαίνει στην Καρτέλα: Bank Material. Εκεί επιλέγεται το υλικό του κάθε τμήματος της όχθης, εισάγεται η διάμετρος που αντιστοιχεί στο 50% των κόκκων και υπολογίζεται η κρίσιμη διατμητική τάση και ο συντελεστής διάβρωσης

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material: Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4, Layer 5. Bank Toe Material: Own data.

Bank and bank-toe material data tables.

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

| Material Descriptors |                   |                               | Bank Model Input Data           |                    |                                            |                    |                                    | Groundwater Model Input Data           |                      |          |                        |                   |                   | Toe Model Input Data             |                          |
|----------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Bank material type   | Description       | Mean grain size, $D_{50}$ (m) | Friction angle $\phi$ (degrees) | Cohesion $c$ (kPa) | Saturated unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | $\phi^*$ (degrees) | Chemical concentration $n$ (kg/kg) | Hydraulic Conductivity $k_{sat}$ (m/s) | Elastic Modulus (Pa) | Porosity | Residual water content | van Genuchten $n$ | van Genuchten $m$ | $\tau_c$ (Pa)                    | $k$ (cm <sup>2</sup> /s) |
| 1                    | Boulders          | 0.512                         | 42.0                            | 0.0                | 20.0                                       | 15.0               | -                                  | 1.745E-03                              | 6.556E+08            | 0.280    | 0.090                  | 3.5237            | 2.3286            | 498                              | 0.004                    |
| 2                    | Cobbles           | 0.128                         | 42.0                            | 0.0                | 20.0                                       | 15.0               | -                                  | 1.745E-03                              | 6.556E+08            | 0.280    | 0.090                  | 3.5237            | 2.3286            | 124                              | 0.009                    |
| 3                    | Gravel            | 0.0113                        | 36.0                            | 0.0                | 20.0                                       | 15.0               | -                                  | 3.160E-03                              | 1.354E+09            | 0.280    | 0.075                  | 3.5237            | 2.3286            | 11.0                             | 0.030                    |
| 4a and 4b            | Angular sand      | 0.00035                       | 36.0                            | 0.0                | 18.0                                       | 15.0               | -                                  | 7.439E-05                              | 1.354E+09            | 0.375    | 0.055                  | 3.5237            | 3.1769            | Coarse (0.71mm) or Fine (0.18mm) |                          |
| 5a and 5b            | Floundered sand   | 0.00035                       | 27.0                            | 0.0                | 18.0                                       | 15.0               | -                                  | 1.130E-06                              | 6.056E+07            | 0.385    | 0.033                  | 4.0563            | 2.3286            |                                  |                          |
| 6a, 6b and 6c        | Silt              | -                             | 30.0                            | 3.0                | 18.0                                       | 15.0               | -                                  | 5.084E-06                              | 1.049E+07            | 0.483    | 0.050                  | 0.6577            | 1.6788            | Erodible (0.100 Pa),             |                          |
| 7a, 7b and 7c        | Soft clay         | -                             | 25.0                            | 10.0               | 18.0                                       | 15.0               | -                                  | 3.473E-07                              | 1.354E+06            | 0.412    | 0.019                  | 1.5812            | 1.4158            | Moderate (5.00 Pa), or           |                          |
| 8a, 8b and 8c        | Stiff clay        | -                             | 20.0                            | 15.0               | 18.0                                       | 15.0               | -                                  | 1.708E-06                              | 5.417E+06            | 0.413    | 0.018                  | 1.4962            | 1.2531            | Resistant (50.0 Pa)              |                          |
| 9                    | Own data layer 1  |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |
|                      | Own data layer 2  |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |
|                      | Own data layer 3  |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |
|                      | Own data layer 4  |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |
|                      | Own data layer 5  |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |
|                      | Own data Bank Toe |                               |                                 |                    |                                            |                    |                                    |                                        |                      |          |                        |                   |                   |                                  |                          |

Need to know the critical shear stress ( $\tau_c$ )?

Input non-cohesive particle diameter (mm):

Critical Shear Stress  $\tau_c$  (Pa):

Need to know the erodibility coefficient ( $k$ )?

Input critical shear stress  $\tau_c$  (Pa):

Erodibility Coefficient (cm<sup>2</sup>/s):

Navigation: Introduction / Tech Background / Model use and FAQ / Input Geometry / Bank Material / Bank Vegetation and Protection / Bank Model Output / Toe Model Output / Url

**Βήμα 5:**

Στο σημείο αυτό και μεταβαίνοντας στην Καρτέλα: Toe Model Output, το υπομοντέλο της διάβρωσης υπολογίζει τη διατμητική τάση και το ποσό της διάβρωσης που θα υποστεί η όχθη βάσει των δεδομένων εισαγωγής. Επίσης δίνεται γραφικά το προφίλ της όχθης που θα διαβρωθεί.

**Toe Model Output**

Verify the bank material and bank and bank-toe protection information entered in the "Bank Material" and "Bank Vegetation and Protection" worksheets. Once you are satisfied that you have completed all necessary inputs, hit the "Run Toe-Erosion Model" button (Center Right of this page).

| Bank Material |          |          |          |          | Bank Toe Material |                                               |  |
|---------------|----------|----------|----------|----------|-------------------|-----------------------------------------------|--|
| Layer 1       | Layer 2  | Layer 3  | Layer 4  | Layer 5  | Own data          | Material                                      |  |
| Own data      | Own data | Own data | Own data | Own data | Own data          | Critical shear stress (Pa)                    |  |
| Own data      | Own data | Own data | Own data | Own data | Own data          | Erodibility Coefficient (cm <sup>3</sup> /Ns) |  |

Legend:

- Base of layer 1
- Base of layer 2
- Base of layer 3
- Base of layer 4
- Base of layer 5
- Eroded Profile
- Water Surface
- Initial Profile

## Run Toe-Erosion Model

|                                       |       |                |
|---------------------------------------|-------|----------------|
| Average applied boundary shear stress |       | Pa             |
| Maximum Lateral Retreat               | 0.000 | cm             |
| Eroded Area - Bank                    | 0.000 | m <sup>2</sup> |
| Eroded Area - Bank Toe                | 0.000 | m <sup>2</sup> |
| Eroded Area - Bed                     | 0.000 | m <sup>2</sup> |
| Eroded Area - Total                   | 0.000 | m <sup>2</sup> |

Export New (Eroded) Profile into Model

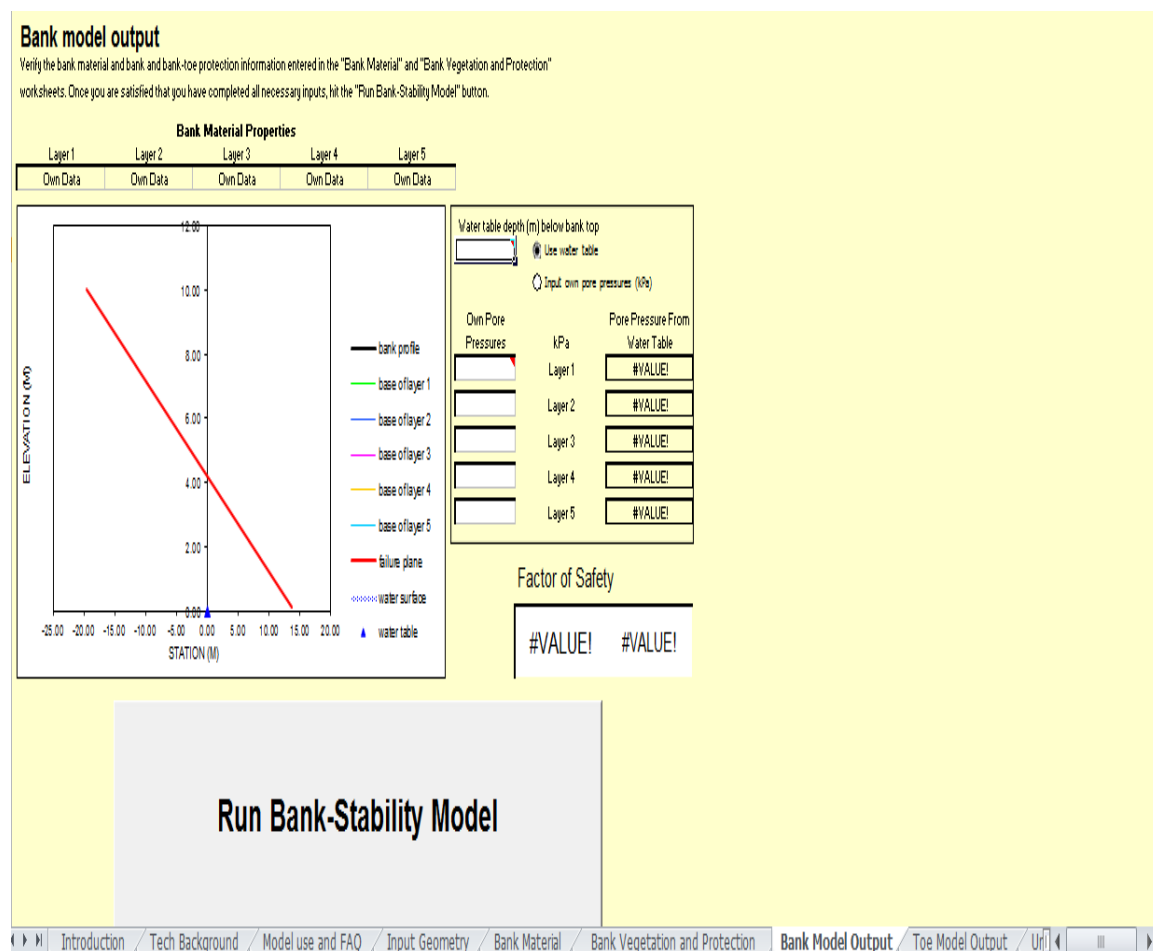
Navigation: Introduction / Tech Background / Model use and FAQ / Input Geometry / Bank Material / Bank Vegetation and Protection / Bank Model Output / Toe Model Output / Url

### Βήμα 6:

Εν συνεχεία το νέο προφίλ -της διαβρωμένης τώρα πια όχθης- εισάγεται πάλι στο μοντέλο προκειμένου να αναλυθεί αυτή τη φορά από πλευράς σταθερότητας (Καρτέλα: Input Geometry). Τα νέα δεδομένα έχουν συμπληρώσει αυτή τη φορά τα κενά στην επιλογή Α. Αφού έχουμε εισάγει όλα τα δεδομένα στο φύλλο γεωμετρίας, επιλέγουμε να προβληθεί η γεωμετρία της όχθης και τρέχουμε τη μακροεντολή της γεωμετρίας του πρανούς.

### Βήμα 7

Στην Καρτέλα: Bank model Output εισάγεται η στάθμη του υδροφορέα (τιμή μετρημένη από την επιφάνεια) και από το μοντέλο της σταθερότητας της όχθης υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ( $F_s$ ) καθώς επίσης και το πλάτος και ο όγκος της αστοχίας και το φορτίο του ιζήματος. Επίσης δίνεται γραφικά το πλάνο της αστοχίας.



### Βήμα 8

Για καλύτερη προσέγγιση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας και των αποτελεσμάτων της αστοχίας ή μη της όχθης, συνυπολογίζεται και η παράμετρος της παρόχθιας βλάστησης. Έτσι λοιπόν εισάγεται το είδος της βλάστησης, η ηλικία των δέντρων και το ποσοστό της συνοχής των ριζών (Καρτέλα: Bank Vegetation and Protection).

**Simulate the mechanical effects of *bank top* vegetation on bank stability using a root-reinforcement model**

RipRoot (Pollen and Simon, 2005) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snapping of roots and the slipping of roots through the soil matrix, by determining the minimum applied load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Waldron (1977), Wu et al. (1979) and Waldron and Dakessian (1981).

**Run Root-Reinforcement Model**

**Root-Reinforcement Model Output**

List of Species  
Percent of Assemblage

Added cohesion due to roots,  $c_r$   kPa

**Protection**

Bank Protection:  Bank Toe Protection:

**Bank and bank-toe protection data table**

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white box.

| Bank and Bank-Toe Protection Descriptors |                             |                               |
|------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Protection type                          | Description                 | Permissible shear stress (Pa) |
| 1                                        | No protection               | -                             |
| 2                                        | Coir fiber                  | 108                           |
| 3                                        | Geotextile (synthetic)      | 144                           |
| 4                                        | Jute net                    | 22                            |
| 5                                        | Large Woody Debris          | 192                           |
| 6                                        | Live fascine                | 100                           |
| 7                                        | Plant cuttings              | 17                            |
| 8                                        | Rip Rap ( $D_{50}$ 0.256 m) | 204                           |
| 9                                        | -                           | -                             |
| 10                                       | -                           | -                             |
| 11                                       | -                           | -                             |
| 12                                       | -                           | -                             |
| 13                                       | Own Data                    | <input type="text"/>          |

References and Data Sources: Data Sources:

Introduction / Tech Background / Model use and FAQ / Input Geometry / Bank Material / Bank Vegetation and Protection / Bank Model Output / Toe Model Output / Unlabeled

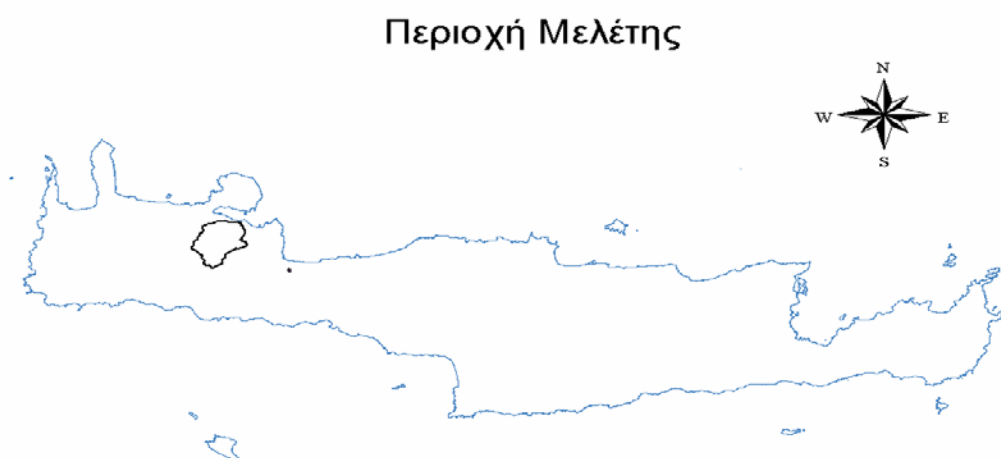
## Βήμα 9

Στο τελικό στάδιο και μεταβαίνοντας στην Καρτέλα: Bank model Output, λαμβάνεται βάσει όλων των δεδομένων ο τελικός συντελεστής ασφαλείας ( $F_s$ ), το πλάτος και ο όγκος της αστοχίας και το φορτίο του ιζήματος. Επίσης δίνεται γραφικά το πλάνο της αστοχίας.

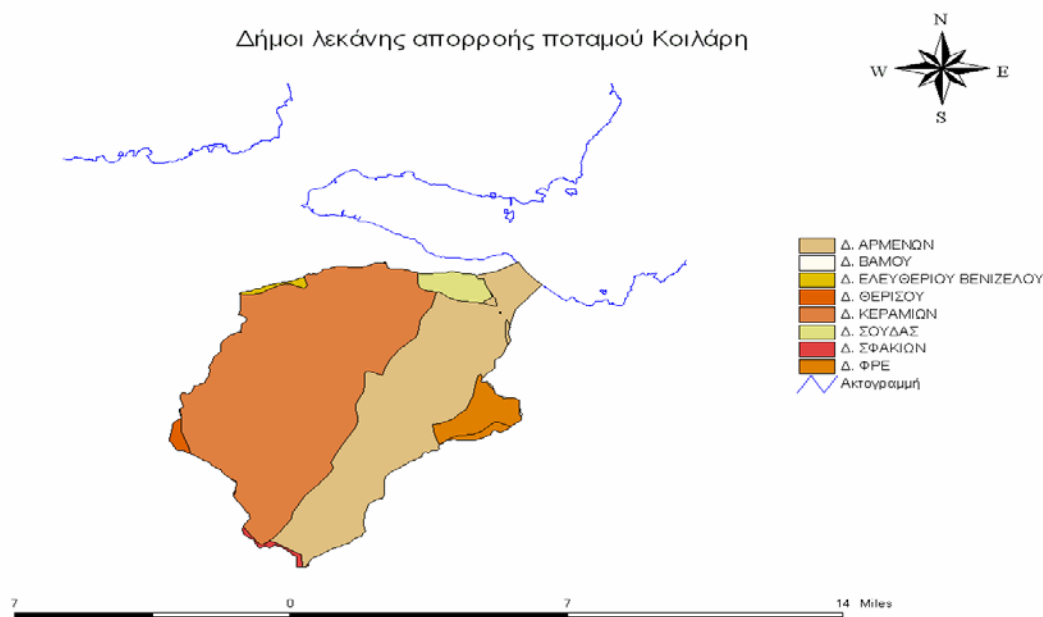
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιοχή μελέτης**

### ***5.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή***

Ανατολικά του Νομού Χανίων στην Κρήτη σε απόσταση περίπου 15 km βρίσκεται η λεκάνη απορροή του ποταμού Κοιλιάρη (Χάρτης 5.1). Το μεγαλύτερο κομμάτι της λεκάνης ανήκει στο Δήμο Αρμένων και στο Δήμο Κεραμιών, αλλά συνολικά σε όλη της την έκταση περιλαμβάνει 17 κοινότητες εκ των οποίων οι 8 είναι πεδινές, 2 ημιορεινές και 7 ορεινές (Χατζηθεοχάρους, 2005). Η έκταση της υπολογίστηκε ότι ανέρχεται σε 130 km<sup>2</sup>. Οι δήμοι που περιλαμβάνονται στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζονται στον χάρτη 5.2 που δημιουργήθηκε από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (G.I.S.).

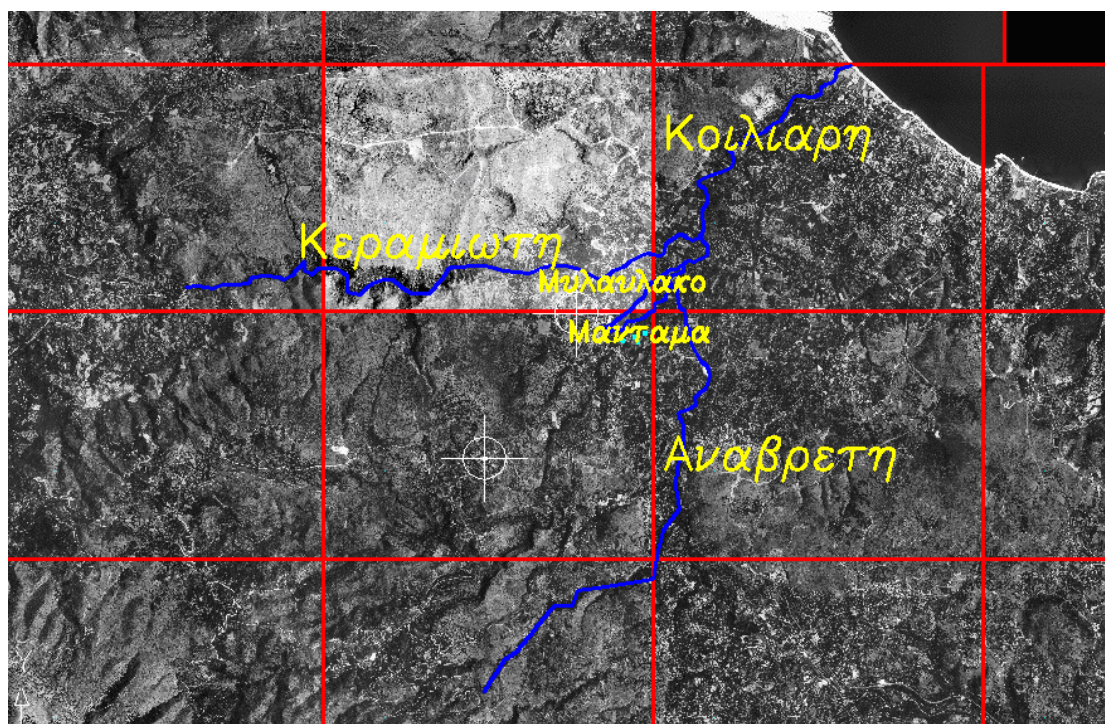


**Χάρτης 5.1:** Γεωγραφική θέση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη



**Χάρτης 5.2:** Δήμοι στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλάρη

Η λεκάνη εκτείνεται από τους πρόποδες των Λευκών Ορέων μέχρι την παράκτια ζώνη του Δήμου Αρμένων και το τελευταίο χωριό που περιλαμβάνεται στη λεκάνη, το οποίο βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο, είναι οι Καρές. Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Κοιλάρη είναι 36 km. Σε αυτόν συμβάλλουν τέσσερις παραπόταμοι, εκ των οποίων δύο χαρακτηρίζονται ως προσωρινά υδατορεύματα (Κεραμιώτης και Αναβρετής), δεδομένου ότι κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται ξήρανση της κοίτης τους, όπως φαίνεται και στον χάρτη 5.3 που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Autocad. Από το σημείο συμβολής των παραποτάμων και μέχρι τις εκβολές το μήκος του κυρίου τμήματος του ποταμού Κοιλάρη είναι 3.3 km (Χατζηθεοχάρους, 2005). Όπως στις περισσότερες λεκάνες απορροής στο Νομό Χανίων, έτσι και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλάρη τροφοδοτείται από τις ποσότητες των υδάτων που προέρχονται από τα Λευκά Όρη. Οι άλλοι δύο παραπόταμοι που συμβάλλουν στον ποταμό Κοιλάρη είναι: ο Μυλαυλακός και ο Μανταμάς και έχουν μόνιμη ροή καθόλη τη διάρκεια του έτους και για αυτό χαρακτηρίζονται ως μόνιμα υδατορέματα (Χατζηθεοχάρους, 2005).



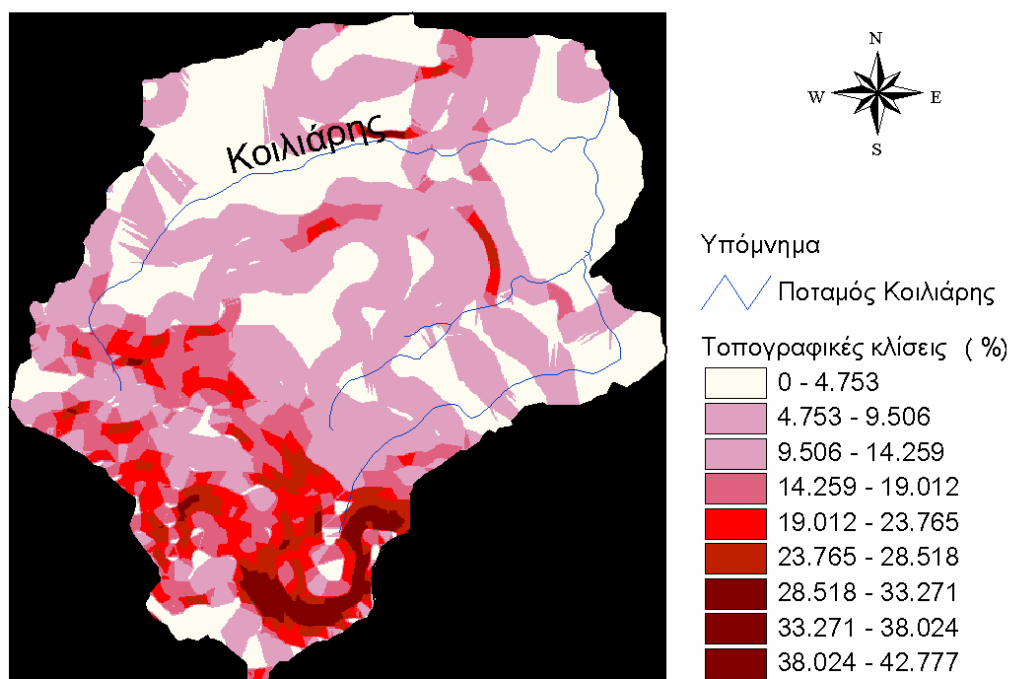
Χάρτης 5.3: Αεροφωτογραφία που διακρίνεται το ποτάμι

## 5.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

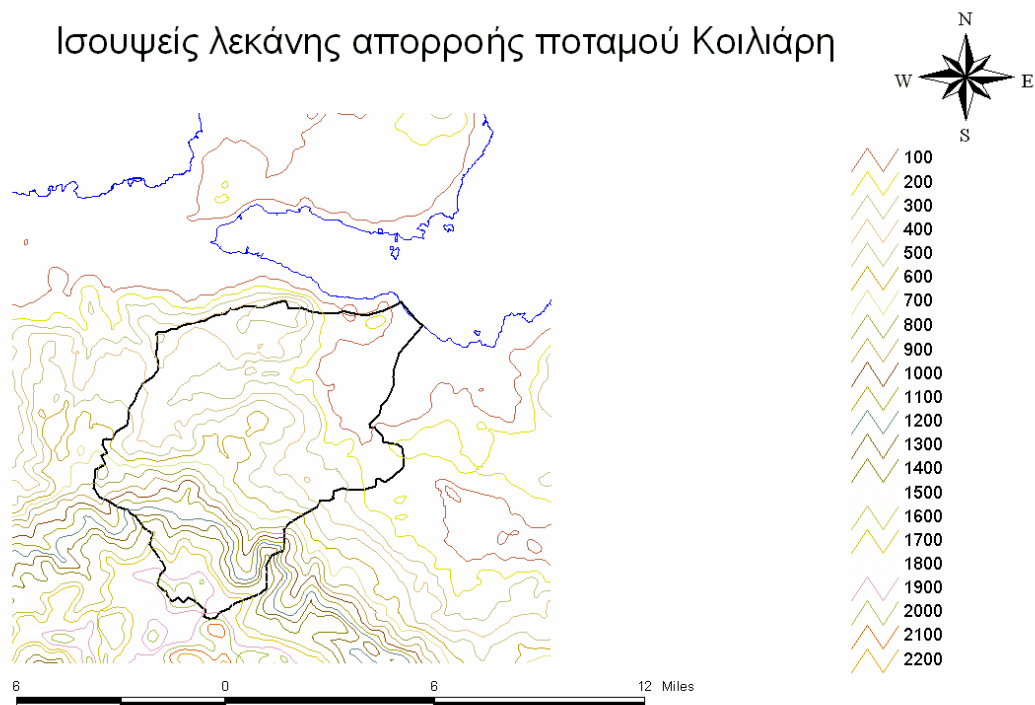
Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως ομαλό με μικρές τοπογραφικές κλίσεις, που φθάνουν όμως μέχρι 12%. Στην πεδινή έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οι κλίσεις είναι αρκετά μικρές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή των πηγών του Στύλου, όπου μετά από μετρήσεις που διεξήχθησαν με τη χρήση θεοδολιχου, η κλίση είναι της τάξης του 1 με 2%. Μάλιστα σε βορειότερο τμήμα του ποταμού, στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου, όπου βρίσκεται η συμβολή όλων των ποταμών και παραποτάμων του Κοιλιάρη, η κλίση υπολογίστηκε 0,6%.

Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί ότι η μέγιστη τοπογραφική κλίση 43% εμφανίζεται στους πρόποδες των Λευκών Ορέων, μιας και η λεκάνη απορροή εκτείνεται μέχρι και το υψόμετρο των 2041 m. (Χάρτης 5.4).

Στον Χάρτη 5.5 (Χατζηθεοχάρους, 2005) παρουσιάζονται και οι ισοϋψείς καμπύλες των 100m στην περιοχή μελέτης.



Χάρτης 5.4: Τοπογραφικές κλίσεις λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρης



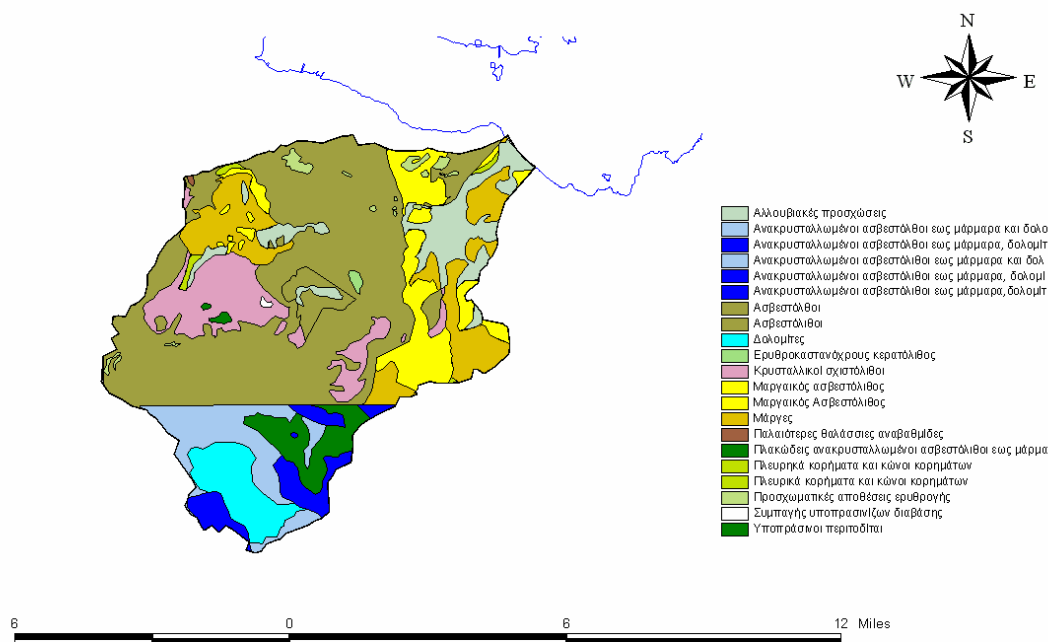
Χάρτης 5.5: Ισοψείς καμπύλες της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

### 5.3 Γεωλογία

Για την γεωλογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωλογικοί χάρτες, το φύλλο 'Χανιά' και το φύλλο 'Βρύσσες', τα οποία συλλέχθηκαν από την υπηρεσία της Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων (Βοζινάκης Κ., 2004) και το Ι.Γ.Μ.Ε (Παυλίδου Σ., 2004).

Οι χάρτες είναι κλίμακας 1:50000, ψηφιοποιήθηκαν στο G.I.S. και ενοποιήθηκαν για την μελέτη της γεωλογίας σε όλη τη λεκάνη απορροής του ποταμού, όπως εμφανίζεται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 5.6).

Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη



**Χάρτης 5.6:** Γεωλογικός χάρτης λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

Σύμφωνα με τις στρωματογραφικές στήλες των γεωλογικών χαρτών που χρησιμοποιήσαμε για μελέτη, στην ευρύτερη περιοχή της Λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται με βάση την ηλικία αυτών, από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι:

- Πλακώδεις ασβεστόλιθοι, οι οποίοι αποτελούνται από δολομίτες, ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μάρμαρα, πυριτικούς σχιστόλιθους και πλακώδεις ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους με πυριτόλιθους.
- Μάρμαρα, δολομίτες, ραούβακες και ανθρακικά κροκαλοπαγή του τεκτονικού καλύμματος Ομαλού.
- Ο γεωλογικός σχηματισμός των σχιστόλιθων της φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς, όπως φυλλίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθοι
- Δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και ασβεστόλιθοι που ανήκουν στη ζώνη Τριπόλεως

Τέλος εμφανίζονται και οι νεότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως μάργες, μαργαικοί ασβεστόλιθοι και αλλουβιακές προσχώσεις.

Οι αλλουβιακές προσχώσεις, πηλοί, άργιλοι, άμμοι και χάλικες, εμφανίζονται σε όλο το πεδινό τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. Επίσης εμφανίζονται σε μικρότερη κλίμακα μάργες, καθώς και πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων. Οι αλλουβιακές προσχώσεις αναπτύσσονται ανατολικά των πηγών και επεκτείνονται μέχρι τη Θάλασσα, το πάχος των οποίων είναι από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα.

Δυτικά της πεδινής έκτασης του ποταμού Κοιλιάρη παρατηρούνται πιθανά και ορατά ρήγματα και γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από μαργαικούς ασβεστόλιθους και ασβεστόλιθους που προέρχονται από τη Ζώνη Τριπόλεως. Στα ρήγματα αυτά εκφορτίζονται υφάλμυρες πηγές, αρκετές από τις οποίες μέσα στον Ποταμό Κοιλιάρη. Γι' αυτό το λόγο στις εκβολές του ποταμού εμφανίζονται μεγάλα όρια χλωρίων.

Αυτοί οι γεωλογικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται δυτικά και φτάνουν μέχρι και τα Λευκά Όρη.

Βόρεια των πηγών του Στύλου παρατηρούνται μαργαικοί ασβεστόλιθοι και μάργες που επεκτείνονται μέχρι τα Λευκά Όρη, ενώ σε μικρότερη κλίμακα εμφανίζονται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι παλαιοζωικής έως και μεσοζωικής ηλικίας.

Στο κομμάτι των Λευκών Ορέων, που ανήκει στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, παρατηρούνται κυρίως γεωλογικοί σχηματισμοί από την αυτόχθονη σειρά Ιονίου ζώνης, όπως επίσης και σχηματισμοί από τις αλλόχθονες σειρές, Ανώτερο Τριαδικό (Λιάσιο) και Μέσο-Ανώτερο (Μειόκαινο).

Από την Ιόνιο ζώνη εμφανίζονται πλακώδεις ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα με πυριτόλιθους.

Από τις αλλόχθονες σειρές που προαναφέραμε παρατηρούνται οι περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί και περιλαμβάνουν:

- Ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα
- Δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, ραούβακες και ανθρακικά κροκαλλοπαγιοί.
- Μάργες και Μαργαικοί ασβεστόλιθοι σε μικρότερη κλίμακα.

Τέλος οι φυλλίτες - χαλαζίτες εμφανίζονται σε μικρή επιφανειακή έκταση νοτιοδυτικά και βορειοδυτικά των πηγών στον ευρύτερο χώρο. Σύμφωνα με την τεκτονική δομή της Κρήτης οι φυλλίτες - χαλαζίτες υπόκεινται των σχηματισμών του καλύμματος της Τρίπολης.

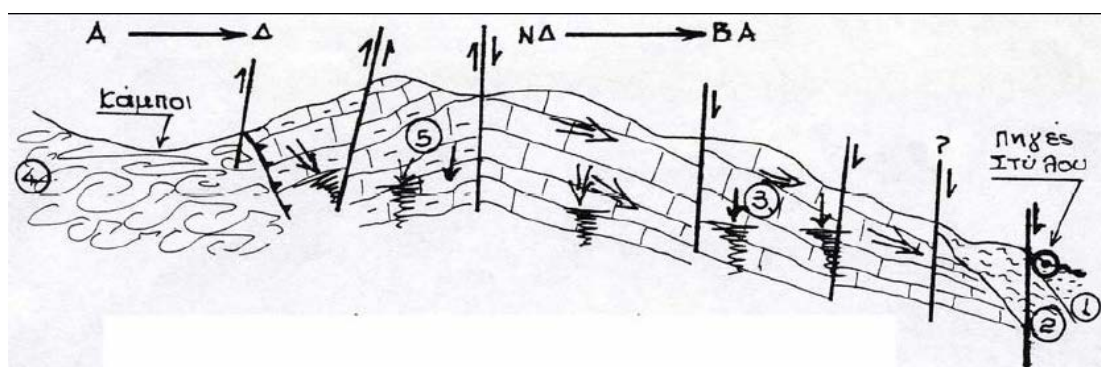
Τη δομή αυτή της τεκτονικής σειράς την συναντούμε σε πολλές περιοχές της Κρήτης ορεινές ή ημιορεινές. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό για γενικές και τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω.

#### **5.4 Υδρογεωλογία**

Το όλο σύστημα του ποταμού Κοιλιάρη τροφοδοτείται κατά κύριο λόγο από τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρυπαλίου και τους πλακώδεις ασβεστόλιθους και σε μικρότερη κλίμακα από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, οι οποίοι βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με το παλαιότερο καρστικό σύστημα. Η κυρίως τροφοδοσία των πηγών του ποταμού Κοιλιάρη γίνεται από το καρστικό ασβεστολιθικό σύστημα των Λευκών Ορέων.

Οι μαργαικοί ασβεστόλιθοι του Νεογενούς είναι άλλο ένα σύστημα που τροφοδοτεί τον ποταμό Κοιλιάρη, μιας και από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους υπάρχει άμεση απορροή.

Μάλιστα οι πηγές που αναβλύζουν στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη εμφανίζονται στην επαφή των αλλουβιακών προσχώσεων με τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Σε μικρότερη κλίμακα συναντώνται και ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης καθώς και φυλλίτες-χαλαζίτες (Βοζινάκης Κ. 2003, Κνιθάκης Μ. 1993).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ:

- 1) Τεταρτογενείς προσχώσεις
- 2) Νεογενή( Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι)
- 3) Ασβεστόλιθοι Δολομίτες του καλύμματος της Τρίπολης
- 4) Φυλλίτες-Χαλαζίτες
- 5) Κρυσταλλικοί πλακώδεις ασβεστόλιθοι

**Σχήμα 5.1:** Σκαριφηματική γεωλογική τομή ανάντη των πηγών Στύλου  
(Πηγή: Κνιθάκης Μ., 1993)

Στην έκταση των Λευκών Ορέων κυριαρχούν τα ανθρακικά πετρώματα δύο βασικών γεωλογικών συστημάτων:

- (α) του αυτόχθονου συστήματος (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι)
- (β) των τεκτονικών καλυμμάτων του Τρυπαλίου και της Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, ανακρυσταλλομένοι ασβεστόλιθοι).

Τη μεγαλύτερη συγκριτικά έκταση καταλαμβάνουν τα ανθρακικά του υποβάθρου και την μικρότερη αυτά του καλύμματος Τρυπαλίου τα οποία εμφανίζονται σε μεγάλα υψόμετρα και σε άμεση επαφή με το υπόβαθρο.

Η περατότητα των πετρωμάτων σε συνδυασμό με την γενική δομή των Λευκών Ορέων συντελούν στην ανάπτυξη υπόγειων υδροφοριών με πολύ μεγάλο υδατικό δυναμικό. Μάλιστα στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται μια πληθώρα υπόγειων υδροφοριών. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι τα πλούσια μετεωρολογικά κατακρημνίσματα που δέχεται το ορεινό συγκρότημα (βροχές και χιόνια) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πλούσια υδροφορία της περιοχής (Κνιθάκης Μ. 1993) .

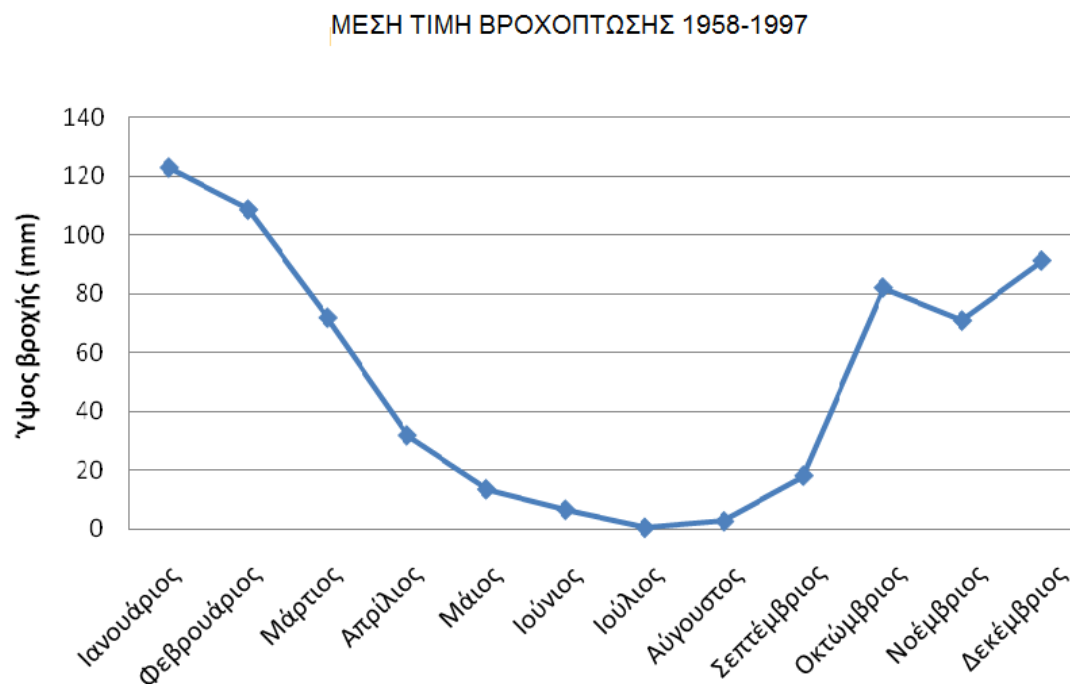
Δευτερεύοντα ρόλο στο υδατικό δυναμικό παίζουν και οι άμεσες απορροές των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων λόγω των μαργαϊκών ασβεστόλιθων.

Αποτέλεσμα αυτών των υδροφοριών είναι οι αναβλύσεις πηγών σημαντικής παροχής σε ορισμένες ζώνες στη βάση του ορεινού όγκου. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες των διαφόρων τμημάτων του ορεινού συγκροτήματος διοχετεύεται το νερό σε περιφερειακές υπόγειες υδροφορίες σε χαμηλότερο υψόμετρο και στη συνέχεια τροφοδοτούνται γνωστές πηγές και γεωτρήσεις μερικές από τις οποίες βρίσκονται και στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Η διαφοροποίηση στις στάθμες των γεωτρήσεων της περιοχής, όπου θα γίνει αναφορά στο παρακάτω κεφάλαιο, καθώς και το διαφορετικό υψόμετρο εκροής των πηγών της ευρύτερης περιοχής οφείλεται στον έντονο τεκτονισμό της λεκάνης στο βορειότερο τμήμα του.

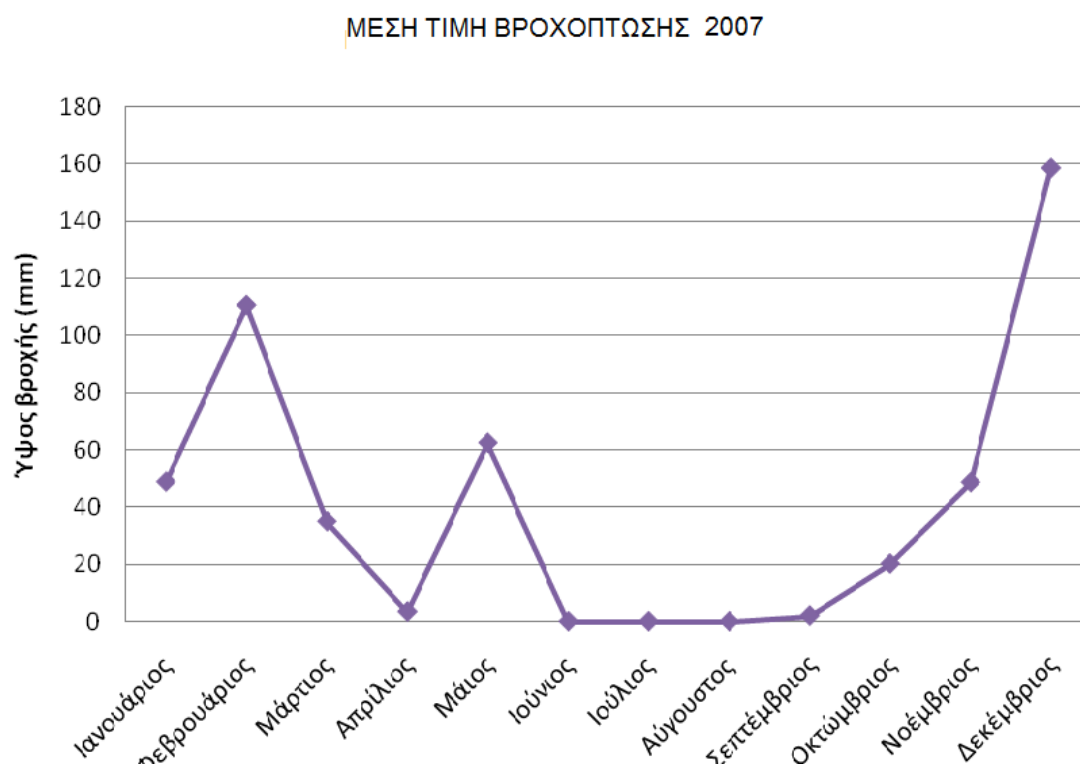
### ***5.5 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά***

Το κλίμα της περιοχής είναι μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και βροχερό και ήπιο χειμώνα. Στην διαμόρφωση του κλίματος της περιοχής επιδρούν σημαντικά: α) το Κρητικό Πέλαγος, όπου πνέουν βόρειοι άνεμοι ισχυροί κατά το χειμώνα και ασθενείς κατά το Θέρος και το Φθινόπωρο, και β) το Ιόνιο Πέλαγος, κυρίως ως προς την βροχερότητα, δεδομένου ότι εκεί καταφθάνουν τα βροχερά νέφη.

Από το Μάιο μέχρι Σεπτέμβριο, το κλίμα είναι υπέρξηρο σύμφωνα με την κλίμακα Lang και Gracanih. Τα πρώτα χιόνια πέφτουν στα Λευκά Όρη από τα μέσα Νοεμβρίου συνήθως και κατά τα μέσα Δεκεμβρίου καλύπτουν τα πρανή και τα υπερκείμενα της εξεταζόμενης περιοχής υψώματα. Ολικοί παγετοί ουδέποτε εμφανίζονται στην περιοχή. Οι μερικοί ή λευκοί παγετοί αποτελούν πολύ σπάνιο φαινόμενο και ως εκ τούτου δεν αποτελούν κίνδυνο στην περιοχή. Χαλάζι πέφτει σπάνια, το μέγεθός του είναι συνήθως μικρό και οι ζημιές επομένως που προκαλεί μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες. Για την μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής χρησιμοποιούνται τα μετεωρολογικά στοιχεία του Σταθμού των Αρμένων, ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 50 μ., σε γεωγραφικό μήκος 24 9' και γεωγραφικό πλάτος 35 25'. Ο σταθμός λειτουργεί από το 1978. Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα (Σχήματα 5.2 και 5.3) με στοιχεία για το ύψος των βροχοπτώσεων τα οποία δόθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας (ύψους 150 m) (Νικολαΐδης Ν.Π., 2010).



Σχήμα 5.2: Μέσες τιμές βροχόπτωσης για το διάστημα 1958-1997



Σχήμα 5.3: Μέσες τιμές βροχόπτωσης το έτος 2007

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μεθοδολογία**

Σε γενικά πλαίσια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τα εξής ακόλουθα στάδια:

- Συλλογή δεδομένων - Τρισδιάστατη απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε, Επιλογή θέσεων που υπέστησαν αστοχία, Εργαστηριακή ανάλυση του ιζήματος που συλλέχθηκε
- Ανάλυση υδρογραφήματος, Επιλογή των πιο σημαντικών πλημμυρικών γεγονότων
- Μοντέλο BSTEM - Προσομοίωση της διάβρωσης και της αστοχίας του πρανούς του ποταμού
- Καθορισμός των ορίων της αστοχίας του πρανούς - Υπολογισμός του λόγου του όγκου της πλημμύρας προς τον όγκο της βροχής ( $V_f/V_R$ ), Συσχέτιση του λόγου αυτού με έναν δείκτη διάβρωσης της όχθης και με τον συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από το μοντέλο
- Επαλήθευση του μοντέλου στις θέσεις όπου έχει γίνει αποκατάσταση της όχθης μετά από πλημμύρες- Επαλήθευση της μεθοδολογίας έπειτα από εφαρμογή της και στον ποταμό Ευρώτα στη Λακωνία
- Σύνδεση των πλημμυρικών γεγονότων με μέτρα αποκατάστασης πρανών

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων αυτών που προαναφέρθηκαν.

### 6.1 Συλλογή δεδομένων

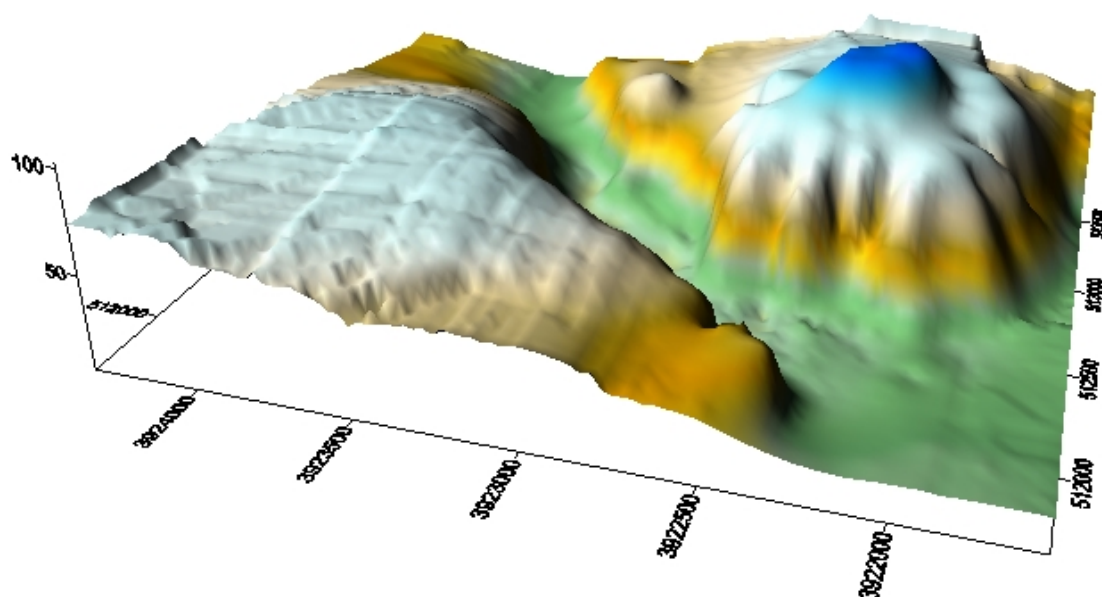
1) Έγινε διεξαγωγή επιτόπιων παρατηρήσεων κατά μήκος του ποταμού Κοιλιάρη με σκοπό την επιλογή θέσεων που έχουν υποστεί διάβρωση ή έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να διαβρωθούν.

Οι φωτογραφίες που παρουσιάζονται στο σημείο αυτό (Εικόνα 6.1), απεικονίζουν ενδεικτικά κάποιες θέσεις που μελετήθηκαν.



Εικόνα 6.1: Κρισιμα σημεία παρόχθιας διάβρωσης στον ποταμό Κοιλιάρη

Η παρόχθια περιοχή του ποταμού που μελετήθηκε (μία έκταση δηλαδή 780 μέτρων) (Εικόνα 6.2) μετρήθηκε θέτοντας ως αρχή (0m) τη γέφυρα (κατάντη του υδρομετρικού σταθμού) και διαιρέθηκε σε τμήματα κάθετα προς τη ροή του ποταμού με τρόπο ώστε να μελετηθεί η κοίτη τόσο από την δεξιά όσο και από την αριστερή πλευρά. Επετεύχθη τρισδιάστατη απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε.



**Εικόνα 6.2:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε

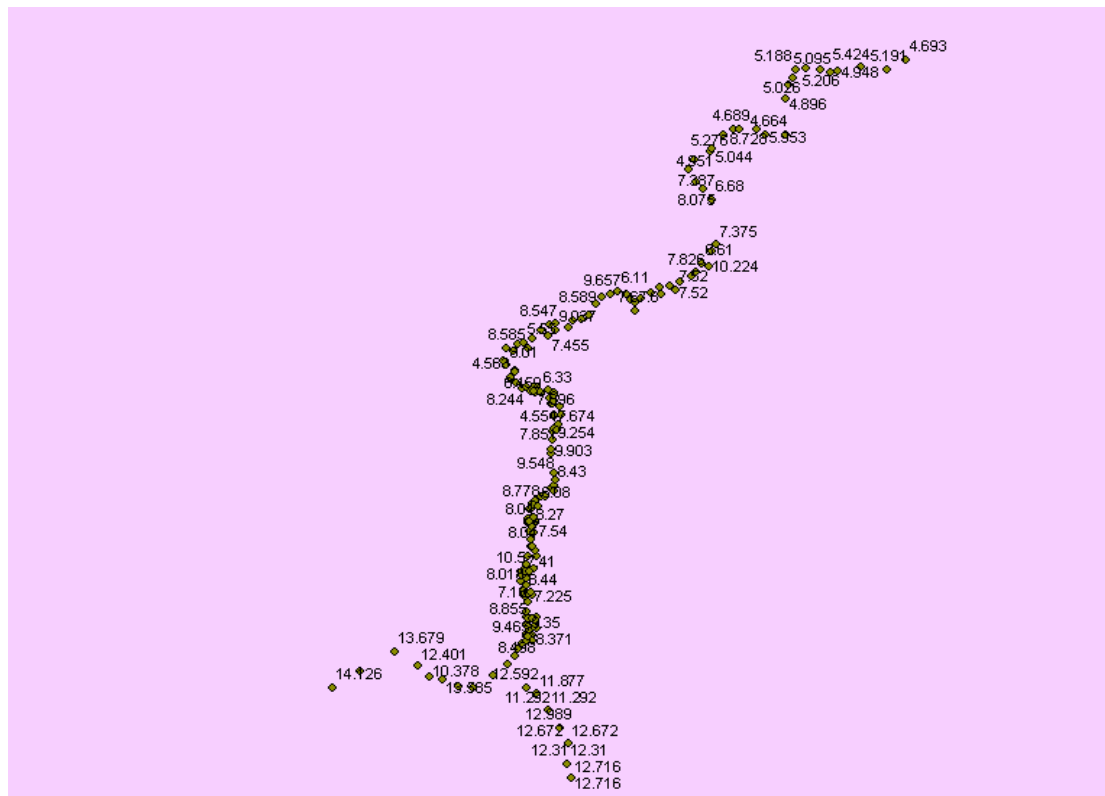
Συνολικά επιλέχθηκαν και τέθηκαν προς μελέτη 9 θέσεις (κρίσιμης σημασίας ως προς τη διάβρωση). Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει αναλυτικά τη θέση κάθε σημείου βάσει των μέτρων κατά μήκος του ποταμού που αντιστοιχούν σε καθεμία από αυτές (Πίνακας 6.1).

**Πίνακας 6.1:** Περιγραφή θέσεων που μελετήθηκαν ως προς τη διάβρωση και την αστοχία

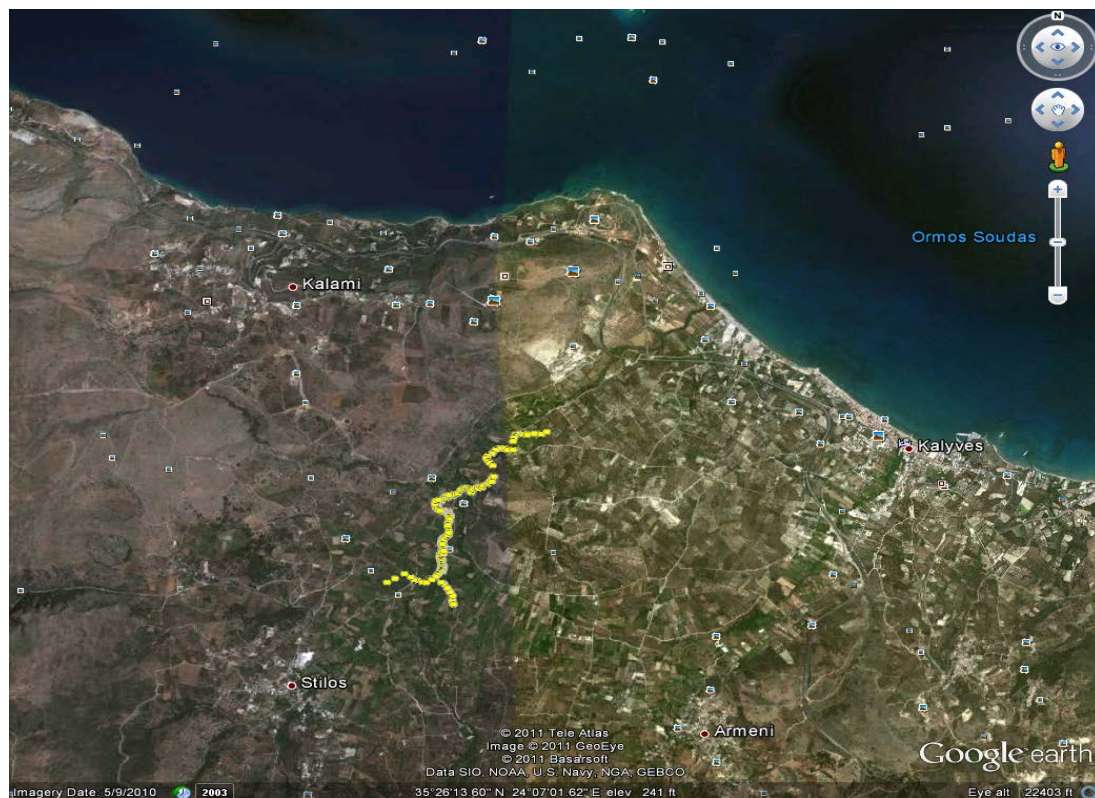
| Σημείο                  | Θέση         | Συνολικό μήκος καναλιού<br>που αντιστοιχεί στο κάθε<br>σημείο(m) |
|-------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------|
| Αριστερή πλευρά ποταμού |              |                                                                  |
| Σ1                      | 8 → 40m      | 32                                                               |
| ΣΑ                      | 60 → 78,3    | 18,3                                                             |
| ΣΒ                      | 190 → 288    | 98                                                               |
| ΣΓ                      | 400 → 441,41 | 41,41                                                            |
| ΣΗ                      | 660 → 675    | 15                                                               |
| ΣΔ                      | 750 → 780    | 30                                                               |
| Δεξιά πλευρά ποταμού    |              |                                                                  |
| ΣΕ                      | 60 → 92      | 32                                                               |
| Σ2                      | 220 → 275    | 55                                                               |
| ΣΖ                      | 540 → 556,46 | 16,46                                                            |

2) Επετεύχθησαν επιτόπιες μετρήσεις με τη βοήθεια του οργάνου θεοδολίχου προκειμένου να βρεθούν οι συντεταγμένες της κάθε θέσης. Ως εκ τούτου, και βάσει της τριγωνομετρίας υπολογίστηκαν οι κλίσεις και οι γωνίες.

3) Έγινε αποτύπωση όλου του μήκους του ποταμού Κοιλιάρη (Εικόνα 6.3α & β) μέσω επιτόπιων μετρήσεων με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού και βρέθηκε για κάθε σημείο που μελετήθηκε, η κλίση καθώς και το μήκος του καναλιού στην περιοχή αυτή.



Εικόνα 6.3α: Απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε



Εικόνα 6.3β: Απεικόνιση του τμήματος του ποταμού Κοιλιάρη που μελετήθηκε

4) Επιπροσθέτως λήφθηκαν δείγματα παρόχθιου εδάφους για την κάθε θέση. Τα δείγματα αυτά αναλύθηκαν εργαστηριακά με τη βοήθεια κοσκίνων. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.2.):

**Πίνακας 6.2:** Περιγραφή κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν

| <b>Αριθμός<br/>κοσκίνου</b> | <b>Διάμετρος κοσκίνου<br/>(mm)</b> |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 10                          | 2                                  |
| 16                          | 1.18                               |
| 40                          | 0.425                              |
| 60                          | 0.25                               |
| 100                         | 0.15                               |
| 200                         | 0.075                              |
| Συλλέκτης                   | -                                  |

Βάσει κοκκομετρικής διαβαθμίσεως και των ορίων του A.S.T.M. έγινε χαρακτηρισμός των δειγμάτων που λήφθηκαν από το κάθε σημείο.

Τέλος, βάσει της παρακάτω τυπολογίας υπολογίστηκε η κρίσιμη διατμητική τάση και ο συντελεστής διάβρωσης (Hanson G.J., Simon A., 2001).

$$\tau_c = 0,06 * 16,2 * D_{50} \text{ για } D_{50} > 2mm \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

$$\tau_c = 0,044 * 16,2 * D_{50} \text{ για } D_{50} < 2mm \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

$$k = 0,1 * \tau_c^{-0,5} \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

Όπου:

$D_{50}$ : η διάμετρος του 50% των κόκκων του υλικού του ποδιού (mm)

$\tau_c$ : η κρίσιμη διατμητική τάση (Pa)

$k$ : ο συντελεστής διάβρωσης ( $\text{cm}^3/\text{Ns}$ )

5) Έγινε διεξαγωγή επιτόπιων παρατηρήσεων και βιβλιογραφική έρευνα προκειμένου να εκτιμηθεί η βλάστηση της παρόχθιας περιοχής. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στον ποταμό Κοιλιάρη κυριαρχούν οι φτελιές (*Ulmus Spp.*), οι ιτιές (*Salix Spp.*) και τα πλατάνια (*Platanus orientalis*). Τα δέντρα της περιοχής μελέτης ανήκουν στην κατηγορία που προσεγγίζει αυτή των *Willow Geyer's*, με μέσο όρο ηλικίας δέντρων 100 χρόνια και ποσοστό φυτοκάλυψης 100%, τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο.

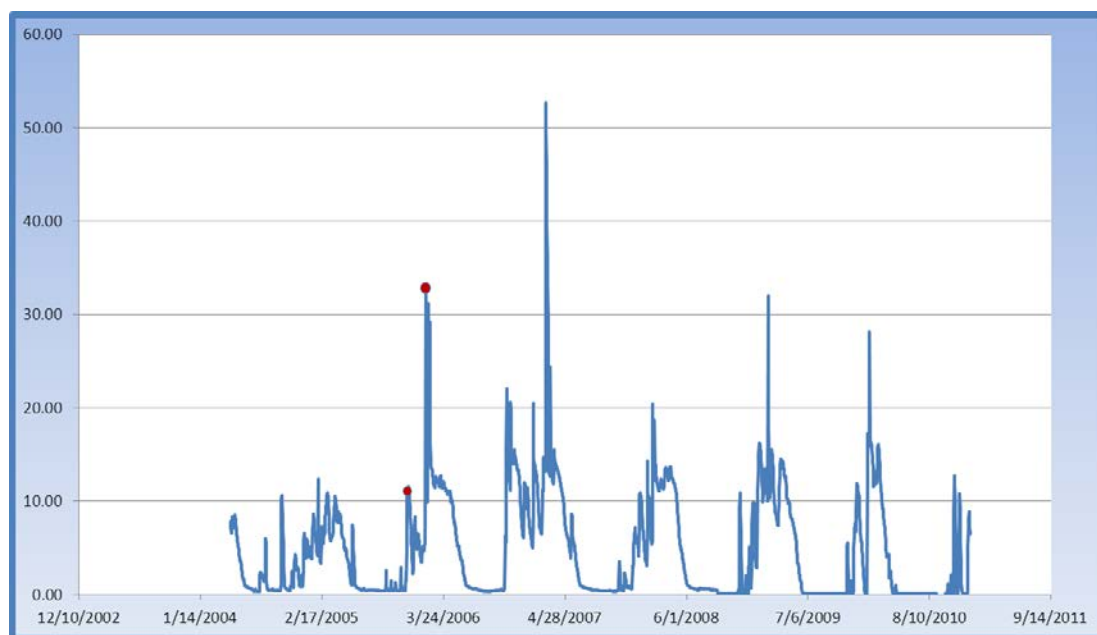
## 6.2 Ανάλυση υδρογραφήματος

1) Έγινε ανάλυση του υδρογραφήματος για τις πιο επικίνδυνες απορροές που έχουν συμβεί ανά την πάροδο των ετών και επιλέχθηκαν τα πλημμυρικά γεγονότα που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εκτέλεση του μοντέλου (στάθμη νερού, διάρκεια πλημμύρας).

Πιο συγκεκριμένα και σε πρώτη φάση, επιλέχθηκε να μελετηθεί το πλημμυρικό φαινόμενο στις 24/01/2006 έως 25/01/2006, όπου η δύναμη της ροής (stream power), έπαιρνε τις μέγιστες τιμές. Στην περίπτωση αυτή η στάθμη του νερού είναι 1,27m και η διάρκεια της ροής 48 hours. Με λίγα λόγια γίνεται προσέγγιση του δυσμενέστερου σεναρίου, όπου και η αστοχία θεωρητικά θα ήταν η μεγαλύτερη.

Σε δεύτερη φάση αποφασίστηκε να γίνει χρήση του μοντέλου στις ίδιες θέσεις αλλά για μία μικρή -αυτή τη φορά- τιμή της στάθμης Η, στο ίδιο υδρολογικό έτος με το πρώτο σενάριο. Συγκεκριμένα μελετούμε το πλημμυρικό φαινόμενο στις 25/11/2005-29/11/2005 όπου η στάθμη ήταν 0,76m και η διάρκεια της ροής 75 hours (όπου έχουμε και την κορυφή του υδρογραφήματος).

Στο παρακάτω υδρογράφημα (Σχήμα 6.1) απεικονίζονται τα δύο πλημμυρικά γεγονότα τα οποία μελετήθηκαν.



**Σχήμα 6.1:** Υδρογράφημα Κοιλιάρη για την περίοδο των ετών 2004-2010

2) Έγινε στατιστική ανάλυση του αρχικού σεναρίου σύμφωνα με τις μεθόδους Gumbel και Log-Pearson προκειμένου να εκτιμηθεί κάθε πόσα χρόνια εμφανίζεται η πλημμύρα που χρησιμοποιήθηκε.

### ***6.3 Προσομοίωση διάβρωσης μέσω BSTEM- Καθορισμός ορίων αστοχίας***

1) Μελετήθηκαν τα πιο σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα που έχουν συμβεί στην υπό μελέτη περιοχή, κατά τη διάρκεια των ετών 2004-2009. Για κάθε γεγονός υπολογίζεται ο λόγος  $V_f/V_R$ , που αντιπροσωπεύει τον όγκο της πλημμύρας προς τον όγκο της βροχής δηλαδή την επιφανειακή απορροή.

2) Έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM για καθεμιά από τις 9 θέσεις, για καθένα από τα παραπάνω 8 πλημμυρικά γεγονότα μεταβάλλοντας κάθε φορά το υλικό της όχθης και του ποδιού (sand, silt, clay). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται για κάθε θέση ανά πλημμυρικό γεγονός το ποσό της διάβρωσης και ο συντελεστής ασφαλείας.

3) Έγινε συσχέτιση και μέσω διαγραμμάτων παρουσιάστηκε πώς συνδέεται η έννοια της αστοχίας του πρανούς (μέσω του συντελεστή ασφαλείας) με αυτή της απορροής (μέσω του λόγου  $V_f/V_R$ ) και με το υλικό της όχθης και του ποδιού.

4) Έγινε προσπάθεια εύρεσης μιας απλής εμπειρικής εξίσωσης που να συσχετίζει τη διάμετρο του 50% των κόκκων του υλικού της όχθης ( $D_{50}$ ), της απορροής ( $V_f/V_R$ ) και του συντελεστή ασφαλείας ( $F_5$ ).

5) Προκειμένου να γίνει μια συμπληρωματική εκτίμηση της διάβρωσης στα διάφορα σημεία του ποταμού Κοιλιάρη για το σενάριο A & B, δηλαδή για το υδρολογικό έτος 2005-2006, έγινε υπολογισμός ενός δείκτη διάβρωσης της όχθης (Bank Erosion Indicator), ο οποίος για τον υπολογισμό του λαμβάνει υπόψη τη δύναμη της ροής, ένα συντελεστή που σχετίζεται με το μήκος του καναλιού καθώς επίσης και το συντελεστή διάβρωσης. Η σχέση από την οποία δίνεται είναι:

Bank Erosion Indicator (BEI) = Unit Stream Power norm \* Sinuosity \* Erodibility

$$\text{Stream Power (W)} = \frac{\rho g S Q}{w}$$

$$\text{Sinuosity} = \frac{L_{chan}}{L_{straight}}$$

Όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού ( $1 \text{ kg/m}^3$ )

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ )

$w$ : το πλάτος του καναλιού (m)

$S$ : η ενεργός κλίση (m/m)

$Q$ : η παροχή ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

$L_{chan}$ : το μήκος του καναλιού (m)

$L_{straight}$ : το μήκος του καναλιού σε ευθεία γραμμή (m)

Erodibility: ο συντελεστής διάβρωσης ( $\text{cm}^3/\text{Ns}$ )

Επίσης έγινε κανονικοποίηση της δύναμης της ροής βάσει του εξής τύπου:

$$w_{norm} = (w - w_{min}) / (w_{max} - w_{min})$$

6) Υπολογίστηκε ο δείκτης διάβρωσης BEI για κάθε μία από τις θέσεις για καθένα από τα σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα κατά το διάστημα 10/1/2004-4/3/2009. Όπως και πριν, συσχετίστηκαν με τη βοήθεια διαγραμμάτων ο δείκτης διάβρωσης (BEI) και η απορροή ( $V_f/V_R$ ). Επίσης έγινε προσέγγιση του επιπέδου εμπιστοσύνης της καμπύλης που δημιουργήθηκε για  $\pm 95\%$ .

### **6.3 Επαλήθευση μοντέλου BSTEM και μεθοδολογίας διάβρωσης**

1) Επαληθεύτηκε το μοντέλο BSTEM και η εν λόγω μεθοδολογία στον ποταμό Κοιλιάρη καθώς και επιβεβαιώθηκε πρακτικά η σημασία και ο λόγος χρήσης του μοντέλου αυτού.

Γνωρίζοντας ότι τοποθετήθηκαν λιθοδομές στον ποταμό την άνοιξη του 2004, έγινε χρήση του μοντέλου σε μία θέση πριν και μετά την τοποθέτηση λιθοδομής. Πιο συγκεκριμένα, έγινε χρήση του μοντέλου στη θέση ΣΖ λαμβάνοντας υπόψιν το πλημμυρικό γεγονός στις 11 Ιανουαρίου του 2004 και εξήχθησαν αποτελέσματα διάβρωσης και αστοχίας της όχθης. Κατόπιν, έγινε και πάλι χρήση του μοντέλου στη θέση αυτή, μετά την τοποθέτηση των λιθοδομών, λαμβάνοντας υπόψιν αυτή τη φορά το πλημμυρικό γεγονός στις 5 Φεβρουαρίου του 2005

2) Τελικά, εφαρμόστηκε και επαληθεύτηκε η παραπάνω μεθοδολογία και σε έναν μεγαλύτερο ποταμό διαλείπουσας ροής, τον Ευρώτα στη Λακωνία.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε ένα σημαντικό πλημμυρικό γεγονός που συνέβη το Νοέμβριο του 2005. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σε μια θέση στην περιοχή της Σπάρτης είναι ότι η όχθη διαβρώθηκε κατά 2-3 m για ένα μήκος καναλιού 120m. Γι αυτό το λόγο έγιναν αντιδιαβρωτικά μέτρα στα πλαίσια του προγράμματος Envifriendly ([www.envifriendly.tuc.gr](http://www.envifriendly.tuc.gr)). Ένα σύστημα αποκατάστασης της όχθης σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, τοποθετώντας λιθοδομή μήκους 120m, πλάτους 2,5m

στη βάση και 1m στην κορυφή, και ύψους 3,5m. Επιπροσθέτως φυτεύτηκαν 200 λεύκες (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: Διαβρωση στην παρόχθια περιοχή της Σπάρτης- Φυτοαποκατάσταση

Προκειμένου λοιπόν να επιβεβαιωθεί η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο αυτό και στον ποταμό Ευρώτα ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Υπολογίστηκε ο δείκτης διάβρωσης BEI σε μία θέση, τόσο για την πραγματική κατάσταση όσο και για την κατάσταση όπου υποτέθηκε ότι στη θέση ήταν ήδη τοποθετημένη λιθοδομή. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν και τοποθετήθηκαν στην ανάλογη καμπύλη που δημιουργήθηκε για τον ποταμό Κοιλιάρη.
- Έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM στη θέση αυτή, για το πλημμυρικό γεγονός του Νοεμβρίου του 2005 τόσο για την πραγματική κατάσταση όσο και για την υποτιθέμενη. Σε τελικό στάδιο, έγινε χρήση του μοντέλου στην ίδια θέση μετά την τοποθέτηση λιθοδομών στην παρόχθια περιοχή το έτος 2006

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα-Συζήτηση**

Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την πρόβλεψη της διάβρωσης και της αστοχίας του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη καθώς και την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας αυτής, στον ποταμό Ευρώτα στη Λακωνία.

### ***7.1 Αποτελέσματα σεναρίων Α' & Β'***

Αρχικά επιλέχθηκε να μελετηθεί το πλημμυρικό φαινόμενο στις 24/01/2006 έως 25/01/2006, όπου η δύναμη της ροής (stream power), έπαιρνε τις μέγιστες τιμές. Στην περίπτωση αυτή η στάθμη του νερού είναι 1,27m και η διάρκεια της ροής 48 hours. Με λίγα λόγια γίνεται προσέγγιση του δυσμενέστερου σεναρίου, όπου και η αστοχία θεωρητικά θα ήταν η μεγαλύτερη.

Σε δεύτερη φάση αποφασίστηκε να γίνει χρήση του μοντέλου στις ίδιες θέσεις αλλά για μία μικρή -αυτή τη φορά- τιμή της στάθμης Η, στο ίδιο υδρολογικό έτος με το πρώτο σενάριο. Συγκεκριμένα μελετήθηκε το πλημμυρικό φαινόμενο στις 25/11/2005-29/11/2005 όπου η στάθμη ήταν 0,76m και η διάρκεια της ροής 75 hours (όπου έχουμε και την κορυφή του υδρογραφήματος).

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 7.1. & 7.2) παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα εισαγωγής για όλες τις θέσεις και για τα δύο σενάρια που έγιναν.

Πίνακας 7.1: Δεδομένα εισαγωγής στο BSTEM για όλες τις θέσεις για το Α' Σενάριο

| <div>A' <div>Σενάριο</div></div> | Γεωμετρία            |                            |                     |                          |                               |                          |              |               |                             | Υλικό                     |             |                                   |                                                      |                                |
|----------------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Θέση                             | Ύψος<br>όχθης<br>(m) | Γωνία<br>όχθης<br>(μοίρες) | Μήκος<br>Toe<br>(m) | Γωνία<br>Toe<br>(μοίρες) | Πάχος<br>τυπιάτων<br>όχθης(m) | Μήκος<br>καναλιού<br>(m) | Κλίση<br>(%) | Στάθμη<br>(m) | Διάρκεια<br>ροής<br>(hours) | Είδος<br>υλικού<br>όχθης  | D50<br>(mm) | Κρίσιμη<br>διατυπτική<br>τάση(Pa) | Συντελεστής<br>διάβρωσης<br><sub>3</sub><br>(cm /Ns) | Water<br>table<br>depth<br>(m) |
| Σ1                               | 2                    | 84                         | 1                   | 15,5                     | 2                             | 32                       | 0,00946      | 1,27          | 48                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,15        | 0,11                              | 0,302                                                | 0,73                           |
| ΣΑ                               | 2                    | 58                         | 1                   | 69                       | 2                             | 18,3                     | 0,1175       | 1,27          | 48                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,21        | 0,15                              | 0,258                                                | 0,73                           |
| ΣΒ                               | 1,9                  | 81                         | 0,9                 | 68,5                     | 1,9                           | 98                       | 0,0042       | 1,27          | 48                          | coarse<br>rounded<br>sand | 0,35        | 0,24948                           | 0,200208                                             | 0,63                           |
| ΣΓ                               | 3                    | 33                         | 1                   | 37                       | 3                             | 41,41                    | 0,0074       | 1,27          | 48                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,3         | 0,21                              | 0,218                                                | 1,73                           |
| ΣΗ                               | 2,023                | 82,5                       | 1                   | 71                       | 2,023                         | 15                       | 0,0274       | 1,27          | 48                          | fine<br>rounded           | 0,3         | 0,21                              | 0,218                                                | 0,753                          |

|    |       |    |     |      |       |     |       |              |      |    |                         |      |          |          |      |  |       |       |
|----|-------|----|-----|------|-------|-----|-------|--------------|------|----|-------------------------|------|----------|----------|------|--|-------|-------|
|    |       |    |     |      |       |     |       |              |      |    | sand                    |      |          |          |      |  |       |       |
| ΣΔ | 2,03  | 44 | 1   | 45,5 | 2,03  |     | 29,75 | 0,046        | 1,27 | 48 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,25     |          | 0,18 |  | 0,236 | 0,76  |
| ΣΕ | 1,44  | 57 | 0,7 | 59   | 1,44  |     | 32    | 0,0094<br>6  | 1,27 | 48 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,2      |          | 0,14 |  | 0,267 | 0,17  |
| Σ2 | 3,6   | 27 | 1   | 33   | 2,5   | 1,1 | 55    | 0,0296<br>36 | 1,27 | 48 | co<br>ars<br>e          | fine | 0,7<br>5 | 0,2<br>3 | 0,35 |  | 0,169 | 2,33  |
| ΣΖ | 2,047 | 57 | 1   | 77   | 2,047 |     | 16,46 | 0,0186       | 1,27 | 48 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,25     |          | 0,18 |  | 0,236 | 0,777 |

Πίνακας 7.2: Δεδομένα εισαγωγής στο BSTEM για όλες τις θέσεις για το Β' Σενάριο

| <i>B'</i><br>Σενάριο | Γεωμετρία            |                            |                     |                          |                               |                          |            |               |                             | Υλικό                     |             |                                   |                                               |                                |
|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| Θέση                 | Ύψος<br>όχθης<br>(m) | Γωνία<br>όχθης<br>(μοίρες) | Μήκος<br>Toe<br>(m) | Γωνία<br>Toe<br>(μοίρες) | Πάχος<br>τμημάτων<br>όχθης(m) | Μήκος<br>καναλιού<br>(m) | Κλίση<br>η | Στάθμη<br>(m) | Διάρκεια<br>ροής<br>(hours) | Είδος<br>υλικού<br>όχθης  | D50<br>(mm) | Κοίσιμη<br>διατμητική<br>τάση(Pa) | Συντελεστής<br>διάβρωσης<br>$\frac{cm^3}{Ns}$ | Water<br>table<br>depth<br>(m) |
| Σ1                   | 2                    | 84                         | 1                   | 15,5                     | 2                             | 32                       | 0,00946    | 0,76          | 75                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,15        | 0,11                              | 0,302                                         | 1,24                           |
| ΣΑ                   | 2                    | 58                         | 1                   | 69                       | 2                             | 18,3                     | 0,1175     | 0,76          | 75                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,21        | 0,15                              | 0,258                                         | 1,24                           |
| ΣΒ                   | 1,9                  | 81                         | 0,9                 | 68,5                     | 1,9                           | 98                       | 0,0042     | 0,76          | 75                          | coarse<br>rounded<br>sand | 0,35        | 0,24948                           | 0,200208                                      | 1,14                           |
| ΣΓ                   | 3                    | 33                         | 1                   | 37                       | 3                             | 41,41                    | 0,0074     | 0,76          | 75                          | fine<br>rounded<br>sand   | 0,3         | 0,21                              | 0,218                                         | 2,24                           |
| ΣΗ                   | 2,023                | 82,5                       | 1                   | 71                       | 2,023                         | 15                       | 0,0274     | 0,76          | 75                          | fine<br>rounded           | 0,3         | 0,21                              | 0,218                                         | 1,263                          |

|    |       |    |     |      |       |     |       |              |      |    |                         |      |          |          |      |  |       |       |
|----|-------|----|-----|------|-------|-----|-------|--------------|------|----|-------------------------|------|----------|----------|------|--|-------|-------|
|    |       |    |     |      |       |     |       |              |      |    | sand                    |      |          |          |      |  |       |       |
| ΣΔ | 2,03  | 44 | 1   | 45,5 | 2,03  |     | 29,75 | 0,046        | 0,76 | 75 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,25     |          | 0,18 |  | 0,236 | 1,27  |
| ΣΕ | 1,44  | 57 | 0,7 | 59   | 1,44  |     | 32    | 0,0094<br>6  | 0,76 | 75 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,2      |          | 0,14 |  | 0,267 | 0,68  |
| Σ2 | 3,6   | 27 | 1   | 33   | 2,5   | 1,1 | 55    | 0,0296<br>36 | 0,76 | 75 | co<br>ars<br>e          | fine | 0,7<br>5 | 0,2<br>3 | 0,35 |  | 0,169 | 2,84  |
| ΣΖ | 2,047 | 57 | 1   | 77   | 2,047 |     | 16,46 | 0,0186       | 0,76 | 75 | fine<br>rounded<br>sand |      | 0,25     |          | 0,18 |  | 0,236 | 1,287 |

Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου από δύο σενάρια που έγιναν. Τα αποτελέσματα του μοντέλου BSTEM, συνίστανται τόσο σε γραφική απεικόνιση όσο και ποσοτικά. Το υπομοντέλο της διάβρωσης της όχθης (Toe Erosion Model) εξάγει αποτελέσματα που αφορούν το μέγεθος της διατμητικής τάσης καθώς και την επιφάνεια της όχθης που υπόκειται σε διάβρωση. Τα αποτελέσματα αυτά καθώς και ο όγκος της περιοχής που διαβρώνεται (τιμή η οποία υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό της επιφάνειας με το μήκος του καναλιού), παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.3):

**Πίνακας 7.3:** Ποσοτικά αποτελέσματα διάβρωσης σύμφωνα με το Α' σενάριο

| <i><b>Α' ΣΕΝΑΡΙΟ</b></i> |                                          |                                           |                                      |
|--------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| <i><b>Θέση</b></i>       | <i><b>Boundary shear stress (Pa)</b></i> | <i><b>Eroded Area (m<sup>2</sup>)</b></i> | <i><b>Amount (m<sup>3</sup>)</b></i> |
| <b>Σ1</b>                | 68,71                                    | 3,22                                      | 103,04                               |
| <b>ΣΑ</b>                | 518,98                                   | 1,634                                     | 29,9                                 |
| <b>ΣΒ</b>                | 20,35                                    | 0,685                                     | 67,13                                |
| <b>ΣΓ</b>                | 43,72                                    | 1,296                                     | 53,67                                |
| <b>ΣΗ</b>                | 133,84                                   | 3,599                                     | 53,985                               |
| <b>ΣΔ</b>                | 233,9                                    | 4,514                                     | 134,3                                |
| <b>ΣΕ</b>                | 47,41                                    | 1,234                                     | 39,5                                 |
| <b>Σ2</b>                | 193,85                                   | 1,92                                      | 105,6                                |
| <b>ΣΖ</b>                | 73,14                                    | 1,606                                     | 26,43                                |

Το υπομοντέλο της σταθερότητας ή μη της όχθης (Bank Stability Model) εξάγει αποτελέσματα που αφορούν το συντελεστή ασφαλείας, το πλάτος και τον όγκο της αστοχίας και το φορτίο του ιζήματος. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται ποσοτικά τα αποτελέσματα του υπομοντέλου της σταθερότητας.

Πίνακας 7.4: Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας σύμφωνα με το Α' σενάριο

| <i>Α' ΣΕΝΑΡΙΟ</i> |                      |                                |                                           |                                 |
|-------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Θέση</i>       | <i>F<sub>s</sub></i> | <i>Πλάτος<br/>αστοχίας (m)</i> | <i>Όγκος<br/>αστοχίας (m<sup>3</sup>)</i> | <i>Φορτίο<br/>ιζήματος (kg)</i> |
| Σ1                | 0,11 <b>Unstable</b> | 1,28                           | 113                                       | 206493                          |
| ΣΑ                | 0,2 <b>Unstable</b>  | 1,6                            | 45                                        | 83411                           |
| ΣΒ                | 0,37 <b>Unstable</b> | 0,65                           | 40                                        | 74296                           |
| ΣΓ                | 4,71 <b>Stable</b>   | -                              | -                                         | -                               |
| ΣΗ                | 0,09 <b>Unstable</b> | 1,52                           | 21                                        | 37906                           |
| ΣΔ                | 0,56 <b>Unstable</b> | 0,21                           | 9                                         | 16254                           |
| ΣΕ                | 0,72 <b>Unstable</b> | 1                              | 14                                        | 64436                           |
| Σ2                | 1,00 <b>Unstable</b> | -3,51                          | 36                                        | 79183                           |
| ΣΖ                | 0,35 <b>Unstable</b> | 0,36                           | 7                                         | 13629                           |

Ακολουθούν αντιστοίχως στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 7.5 & 7.6) τα αποτελέσματα του μοντέλου που προέκυψαν από την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου.

Πίνακας 7.5: Ποσοτικά αποτελέσματα διάβρωσης σύμφωνα με το Β' σενάριο

| <i>Β' ΣΕΝΑΡΙΟ</i> |                                       |                                        |                                   |
|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Θέση</i>       | <i>Boundary shear<br/>stress (Pa)</i> | <i>Eroded Area<br/>(m<sup>2</sup>)</i> | <i>Amount<br/>(m<sup>3</sup>)</i> |
| Σ1                | 42,45                                 | 1,746                                  | 55,87                             |
| ΣΑ                | 334,94                                | 1,042                                  | 19,07                             |
| ΣΒ                | 14,55                                 | 0,322                                  | 31,56                             |
| ΣΓ                | 26,31                                 | 0,442                                  | 18,30                             |
| ΣΗ                | 86,06                                 | 0,922                                  | 14,88                             |

|    |        |       |       |
|----|--------|-------|-------|
| ΣΔ | 147,35 | 0,6   | 17,85 |
| ΣΕ | 28,32  | 0,493 | 15,78 |
| ΣΖ | 100,77 | 0,861 | 47,35 |
| ΣΖ | 55,61  | 0,909 | 14,96 |

Πίνακας 7.6: Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας σύμφωνα με το Β' σενάριο

| <i><b>Β' ΣΕΝΑΡΙΟ</b></i> |                                |                                       |                                                  |                                        |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <i><b>Θέση</b></i>       | <i><b><math>F_s</math></b></i> | <i><b>Πλάτος<br/>αστοχίας (m)</b></i> | <i><b>Όγκος<br/>αστοχίας (m<sup>3</sup>)</b></i> | <i><b>Φορτίο<br/>ιζήματος (kg)</b></i> |
| Σ1                       | 0,07 <b>Unstable</b>           | 3,34                                  | 169                                              | 306917                                 |
| ΣΑ                       | 0,18 <b>Unstable</b>           | 1,21                                  | 46                                               | 83875                                  |
| ΣΒ                       | 0,71 <b>Unstable</b>           | 0,28                                  | 42                                               | 75899                                  |
| ΣΓ                       | 4,74 <b>Stable</b>             | -                                     | -                                                | -                                      |
| ΣΗ                       | 0,24 <b>Unstable</b>           | 0,79                                  | 18                                               | 32262                                  |
| ΣΔ                       | 0,76 <b>Unstable</b>           | -0,39                                 | 19                                               | 35379                                  |
| ΣΕ                       | 3,38 <b>Stable</b>             | -                                     | -                                                | -                                      |
| ΣΖ                       | 0,52 <b>Unstable</b>           | -4,79                                 | 5                                                | 9188                                   |
| ΣΖ                       | 0,15 <b>Unstable</b>           | 1,5                                   | 55                                               | 99239                                  |

Όπως διαπιστώνεται από τα ποσά διάβρωσης καθώς και τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ) των παραπάνω πινάκων, τα τμήματα του ποταμού που μελετήθηκαν, κρίνονται ως «κρίσιμα» ως προς τη διάβρωση και την αστοχία. Παρατηρείται στο πρώτο σενάριο ότι ένα μόνο από τα τμήματα δεν αστοχεί (ΣΓ), παρόλο που υπόκειται σε διάβρωση. Σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο όπου το πλημμυρικό γεγονός που μελετάται είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με το πρώτο, τα τμήματα αυτά του ποταμού είναι και πάλι ασταθή με εξαίρεση το ΣΓ και το ΣΕ.

## 7.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης

Για το αρχικό σενάριο όπου το ύψος της στάθμης που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο ήταν 1,27m, τιμή η οποία αντιστοιχεί σε παροχή  $46,53\text{m}^3/\text{sec}$ , έγινε στατιστική ανάλυση προκειμένου να εκτιμηθεί κάθε πόσα χρόνια εμφανίζεται η περίπτωση αυτή. Οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι η Gumbel και η Log-Pearson. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7.

Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης

| <i>T (years)</i>  | <i>Q κατά Gumbel</i>     | <i>Q κατά Log-Pearson</i> |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|
|                   | <i>(m<sup>3</sup>/s)</i> | <i>(m<sup>3</sup>/s)</i>  |
| 2                 | 9.84                     | 8.44                      |
| 4                 | 16.08                    | 14.25                     |
| 6                 | 19.32                    | 21.70                     |
| 8                 | 21.53                    | 21.87                     |
| 10                | 23.21                    | 22.00                     |
| 15                | 26.22                    | 27.80                     |
| 50                | 34.94                    | 33.65                     |
| 100               | 39.90                    | 41.36                     |
| <b>200</b>        | <b>44.84</b>             | <b>47.21</b>              |
| 1000              | 56.28                    | 60.76                     |
| Μέσος Όρος        | 29.22                    | 29.90                     |
| Goodness of fit - | 2.11                     |                           |
| RMSE              |                          |                           |

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η περίπτωση αυτή που μελετήσαμε ( $H=1,27\text{m}$ ), εμφανίζεται κάθε 200 χρόνια.

### 7.3 Υπολογισμός απορροής σε πλημμυρικά γεγονότα

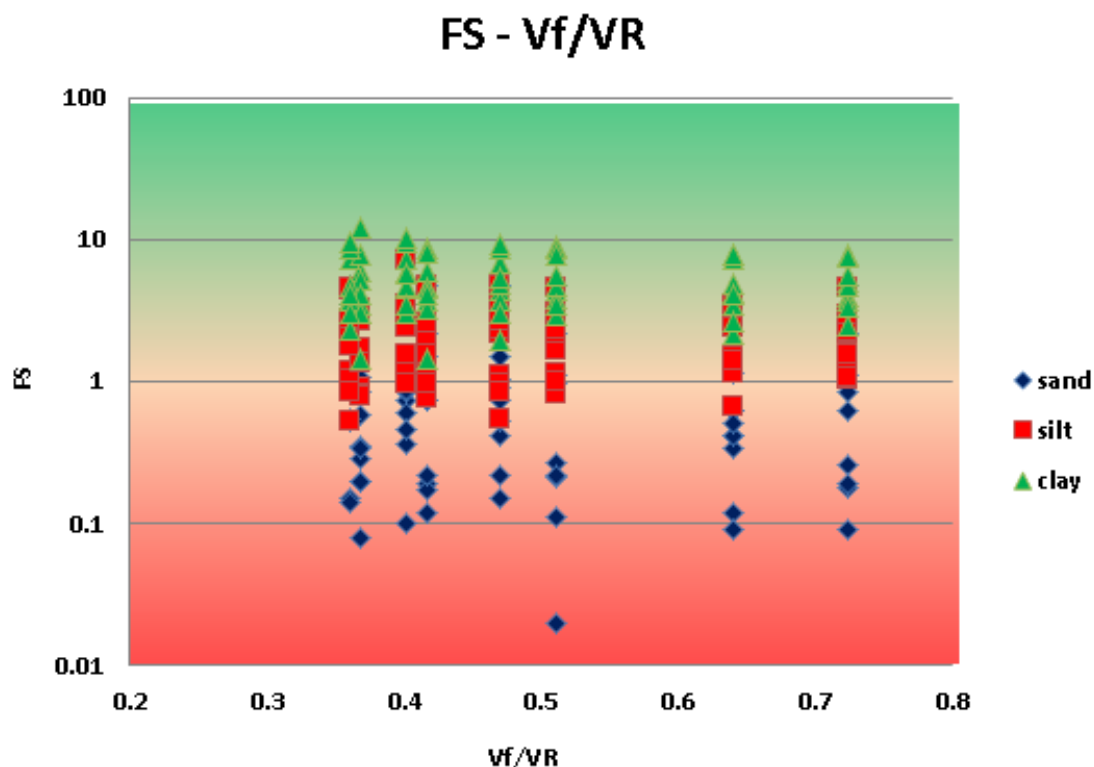
Για τη διάρκεια των ετών 2004-2009 μελετήθηκαν τα πιο σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα, και για κάθε γεγονός υπολογίστηκε ο λόγος  $V_f/V_R$ , που αντιπροσωπεύει τον όγκο της πλημμύρας προς τον όγκο της βροχής, δηλαδή την απορροή. Στον πίνακα (Πίνακας 7.8) που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά.

Πίνακας 7.8: Απορροή ανά πλημμυρικό γεγονός

| Πλημμυρικό γεγονός | Μέγιστη Παροχή<br>( $m^3/sec$ ) | Διάρκεια<br>(days) | $V_f/V_R$ |
|--------------------|---------------------------------|--------------------|-----------|
| 1) 10/1/04-18/1/04 | 23,58                           | 9                  | 0,64      |
| 2) 19/1/06-31/1/06 | 42,10                           | 13                 | 0,40      |
| 3) 23/2/07-2/3/07  | 30,89                           | 8                  | 0,37      |
| 4) 21/3/07-26/3/07 | 50,49                           | 6                  | 0,42      |
| 5) 27/12/07-7/1/08 | 35,12                           | 12                 | 0,51      |
| 6) 24/1/08-5/2/08  | 31,09                           | 13                 | 0,72      |
| 7) 10/2/08-20/2/08 | 36,52                           | 11                 | 0,36      |
| 8) 23/2/09-4/3/09  | 31,29                           | 10                 | 0,47      |

### 7.4 Αποτελέσματα συσχέτισης αστοχίας με την απορροή και το υλικό

Προκειμένου να γίνει συσχέτιση της αστοχίας του πρανούς με την απορροή και το υλικό της όχθης, επιλέχθηκε για καθένα από τα παραπάνω 8 πλημμυρικά γεγονότα και για καθεμιά από τις 9 θέσεις του ποταμού να γίνει χρήση του μοντέλου BSTEM. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και σε κάθε τρέξιμο του μοντέλου μεταβλήθηκε διαδοχικά το υλικό της όχθης και του ποδιού (sand, silt, clay). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε για κάθε θέση, ανά πλημμυρικό γεγονός, ο συντελεστής ασφαλείας (Σχήμα 7.1).



**Σχήμα 7.1:** Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας με την απορροή και το υλικό

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Το υλικό της όχθης και του ποδιού επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ), δηλαδή το αν θα αστοχήσει το πρανές ή όχι. Πιο συγκεκριμένα, η άμμος (μη συνεκτικό υλικό) είναι υλικό πολύ επιρρεπές στην αστοχία. Ακολουθεί η άργιλος (συνεκτικό υλικό), οι τιμές του συντελεστή αστοχίας της οποίας συνδέονται με υπό συνθήκες σταθερά πρανή και τέλος η ιλύς (συνεκτικό υλικό) η οποία συνδέεται με ιδιαίτερα σταθερά πρανή.
- 2) Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, όσο πλησιάζουμε σε πιο έντονα πλημμυρικά γεγονότα όπου οι τιμές της απορροής είναι μεγαλύτερες, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας μειώνονται δηλαδή κινούμαστε σε όλο πιο ασταθή πρανή.
- 3) Η βλάστηση (μεταβλητή η οποία συνυπολογίστηκε για την εύρεση των παραπάνω συντελεστών ασφαλείας) παρόλο που δε μεταβάλλει τη γενική μορφή του διαγράμματος, επηρεάζει τις τιμές των αποτελεσμάτων. Η βλάστηση αποτελεί δύναμη αντίστασης ως προς την αστοχία. Διαπιστώνεται ότι για το ίδιο υλικό και για ίδιο πλημμυρικό γεγονός, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι θα ήταν μικρότερες (δηλαδή έχουμε λιγότερο σταθερά πρανή) στην περίπτωση που δεν υπήρχε βλάστηση στην παρόχθια περιοχή.

### ***7.5 Μαθηματική εξίσωση συσχέτισης αστοχίας με την απορροή και το υλικό***

Έγινε προσπάθεια εύρεσης μιας απλής εμπειρικής εξίσωσης που να συσχετίζει τη διάμετρο του 50% των κόκκων του υλικού της όχθης ( $D_{50}$ ), της απορροής ( $V_f/V_R$ ) και του συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ) στην περιοχή μελέτης του ποταμού Κοιλιάρη. Έπειτα από δοκιμές και επαληθεύσεις η εξίσωση που παράχθηκε είναι η εξής:

$$F_s = z D_{50} \left( \frac{V_f}{V_R} \right)^{-1.5} \quad \text{για } V_f/V_R < 1$$

Όπου  $z=0,8$  για sand

$z=15$  για silt

$z=500$  για clay

Το πρηνές είναι σταθερό εάν το  $F_s$  είναι μεγαλύτερο από 1,3, ώστε να παρέχει ένα περιθώριο ασφάλειας για αβέβαια ή μεταβλητά στοιχεία. Τα πρηνή με τιμή  $F_s$  μεταξύ 1,0 και 1,3 θεωρούνται "υπό όρους σταθερά", δηλ. σταθερά αλλά με λίγο περιθώριο ασφάλειας. Τα πρηνή με τιμή  $F_s$  λιγότερο από 1,0 είναι ασταθή.

### ***7.6 Εκτίμηση διάβρωσης με τη βοήθεια του δείκτη Bank Erosion Indicator (BEI)***

Προκειμένου να γίνει μια συμπληρωματική εκτίμηση της διάβρωσης στα διάφορα σημεία του ποταμού Κοιλιάρη για το σενάριο A & B, δηλαδή για το υδρολογικό έτος 2005-2006, έγινε υπολογισμός ενός δείκτη διάβρωσης της όχθης (Bank Erosion Indicator). Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται αναλυτικά οι όροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη αυτού. Στην τελευταία στήλη του πίνακα παρουσιάζεται ο δείκτης διάβρωσης χωρίς μονάδες, όπως αυτός προέκυψε με διαίρεση της τιμής του BEI της κάθε θέσης, με την μεγαλύτερη εξ' αυτών. Αυτό

βοηθά στη σύγκριση ως προς τη διάβρωση, των διαφόρων θέσεων του ποταμού μεταξύ τους.

**Πίνακας 7.9:**Υπολογισμός του δείκτη διάβρωσης για το υδρολογικό έτος 2005-2006

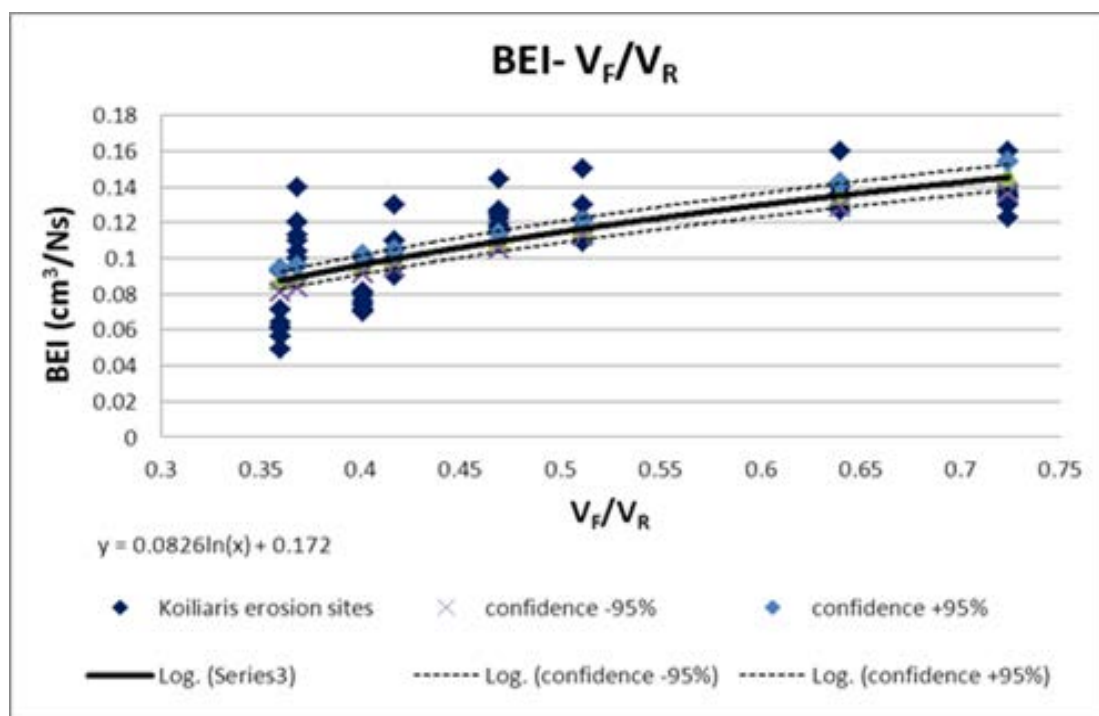
| Θέση | Unit<br>Stream<br>Power <sub>norm</sub> | Sinuosity | Erodibility<br>(cm <sup>3</sup> /Ns) | BEI<br>(cm <sup>3</sup> /Ns) | BEI  |
|------|-----------------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------------------|------|
| Σ1   | 0,15                                    | 1         | 0,302                                | 0,044                        | 0,8  |
| ΣΑ   | 0,15                                    | 1,11      | 0,258                                | 0,042                        | 0,76 |
| ΣΒ   | 0,15                                    | 1,88      | 0,2                                  | 0,055                        | 1    |
| ΣΓ   | 0,15                                    | 1,25      | 0,218                                | 0,040                        | 0,72 |
| ΣΗ   | 0,15                                    | 1,25      | 0,218                                | 0,040                        | 0,72 |
| ΣΔ   | 0,15                                    | 1,07      | 0,236                                | 0,037                        | 0,67 |
| ΣΕ   | 0,15                                    | 1,11      | 0,267                                | 0,043                        | 0,79 |
| Σ2   | 0,15                                    | 1,88      | 0,169                                | 0,046                        | 0,85 |
| ΣΖ   | 0,15                                    | 1,16      | 0,236                                | 0,04                         | 0,73 |

Από τον Πίνακα 7.9 παρατηρείται ότι η διάβρωση σε όλα τα σημεία του ποταμού κατά το υδρολογικό έτος 2005-2006 είναι σημαντική και κυμαίνεται περίπου στα ίδια επίπεδα σε όλες τις θέσεις. Οι λόγοι που συνηγορούν σε αυτό είναι ότι:

- 1) Η δύναμη της ροής (stream power) έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες ημερήσιες τιμές παροχής σε όλα τα σημεία λόγω έλλειψης πιο ακριβών δεδομένων.
- 2) Το υλικό της όχθης και του ποδίου που επηρεάζει κατά κόρον την τιμή του συντελεστή διάβρωσης (erodibility), είναι κοινό σε όλο το μήκος του ποταμού Κοιλιάρη.

Ωστόσο σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή και αν συγκριθούν τα αποτελέσματα των διαφόρων τμημάτων του ποταμού μεταξύ τους, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η θέση με τη μεγαλύτερη προβλεπόμενη διάβρωση είναι η ΣΒ.

Γίνεται υπολογισμός του δείκτη διάβρωσης BEI για κάθε μία από τις θέσεις για καθένα από τα πλημμυρικά γεγονότα κατά το διάστημα 10/1/2004-4/3/2009. Όπως και πριν, συσχετίζονται με τη βοήθεια διαγράμματος (Σχήμα 7.2) ο δείκτης διάβρωσης (BEI) και η απορροή ( $V_f/V_R$ ). Επίσης έγινε προσέγγιση του επιπέδου εμπιστοσύνης της καμπύλης για  $\pm 95\%$ , όπως διακρίνεται στο Σχήμα 7.2.



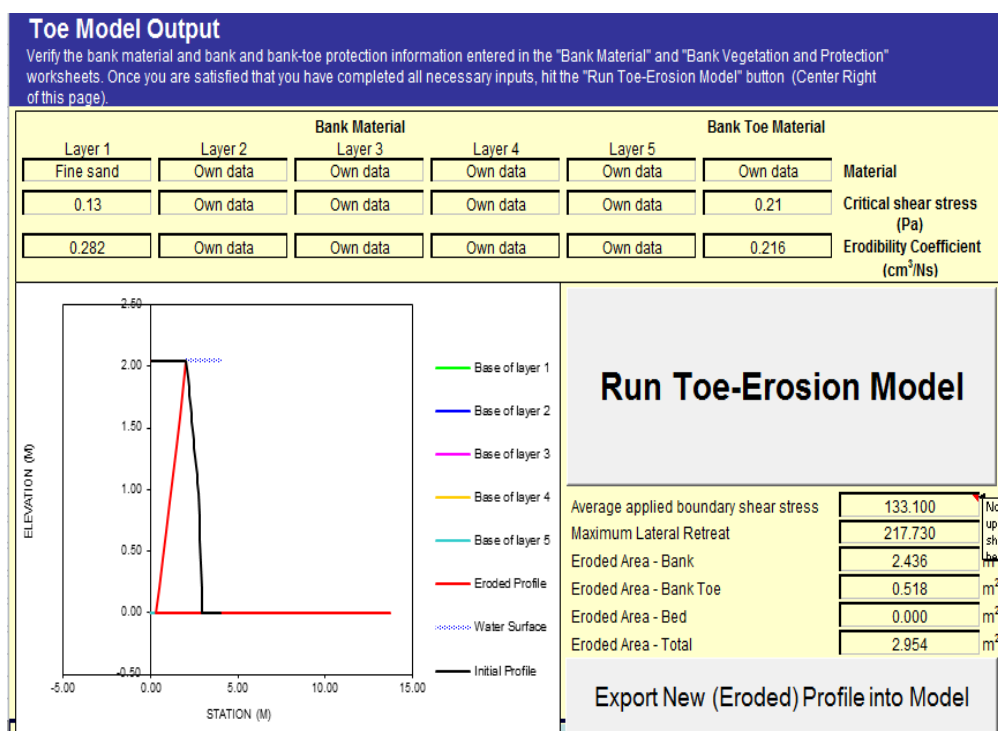
**Σχήμα 7.2:** Συσχέτιση δείκτη διάβρωσης με την απορροή

Η παραπάνω καμπύλη, που συσχετίζει την απορροή με τη διάβρωση, παρουσιάζει αυξητική πορεία. Πράγμα το οποίο είναι και αναμενόμενο λόγω του ότι όσο μεγαλύτερο και πιο έντονο είναι το πλημμυρικό γεγονός, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να διαβρωθεί το πρηνές. Από ένα σημείο και μετά σταματάει η αύξηση. Σημειώνεται στο σημείο αυτό πώς οι μεγαλύτερες τιμές που παρατηρήθηκαν έφθασαν τα  $0,16 \text{ cm}^3/\text{Ns}$ . Η διάβρωση επηρεάζεται από την παροχή αλλά και από το υλικό της όχθης, το οποίο είναι το ίδιο κατά μήκος του ποταμού Κοιλιάριου.

### 7.7 Επαλήθευση μοντέλου BSTEM

Σε επόμενο στάδιο έγινε προσπάθεια να επαληθευτεί το μοντέλο BSTEM και η εν λόγω μεθοδολογία στον ποταμό Κοιλιάρη καθώς και να επιβεβαιωθεί η πραγματικότητα. Γνωρίζοντας ότι τοποθετήθηκαν λιθοδομές προς αποφυγήν της διάβρωσης στον ποταμό την άνοιξη του 2004, έγινε χρήση του μοντέλου σε μία θέση πριν και μετά την τοποθέτηση λιθοδομής.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε χρήση του μοντέλου στη θέση ΣΖ λαμβάνοντας υπόψιν το πλημμυρικό γεγονός στις 11 Ιανουαρίου του 2004, όπου είχαμε τη μέγιστη τιμή της παροχής ( $Q = 78,62 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) κατά τους χειμερινούς μήνες του έτους 2004. Κάνοντας χρήση της εξίσωσης Rating Curve για την περίοδο αυτή ( $Q = 7 H^{2.1}$ ), υπολογίστηκε η στάθμη  $H$ . Η στάθμη αυτή υπολογίστηκε στα 3,16m. Από την άλλη πλευρά, το ύψος του πρανούς στη θέση ΣΖ είναι 2,047m. Επειδή το μοντέλο BSTEM αδυνατεί να εξάγει αποτελέσματα σε συνθήκες «full bank», τέθηκε η οριακή τιμή 2,046m στη στάθμη και ελήφθη το εξής προφίλ για τη διαβρωμένη όχθη (Σχήμα 7.3):



Σχήμα 7.3: Προφίλ διαβρωμένης όχθης πριν την τοποθέτηση λιθοδομών

Κατόπιν, έγινε και πάλι χρήση του μοντέλου στη θέση αυτή, μετά την τοποθέτηση των λιθοδομών, λαμβάνοντας υπόψιν αυτή τη φορά το πλημμυρικό γεγονός στις 5 Φεβρουαρίου του 2005 ( $Q = 12,39 \text{ m}^3/\text{sec}$ ). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η στάθμη και έγινε είσοδος στο μοντέλο. Αυτή τη φορά το προφίλ της όχθης είναι το εξής (Σχήμα 7.4):



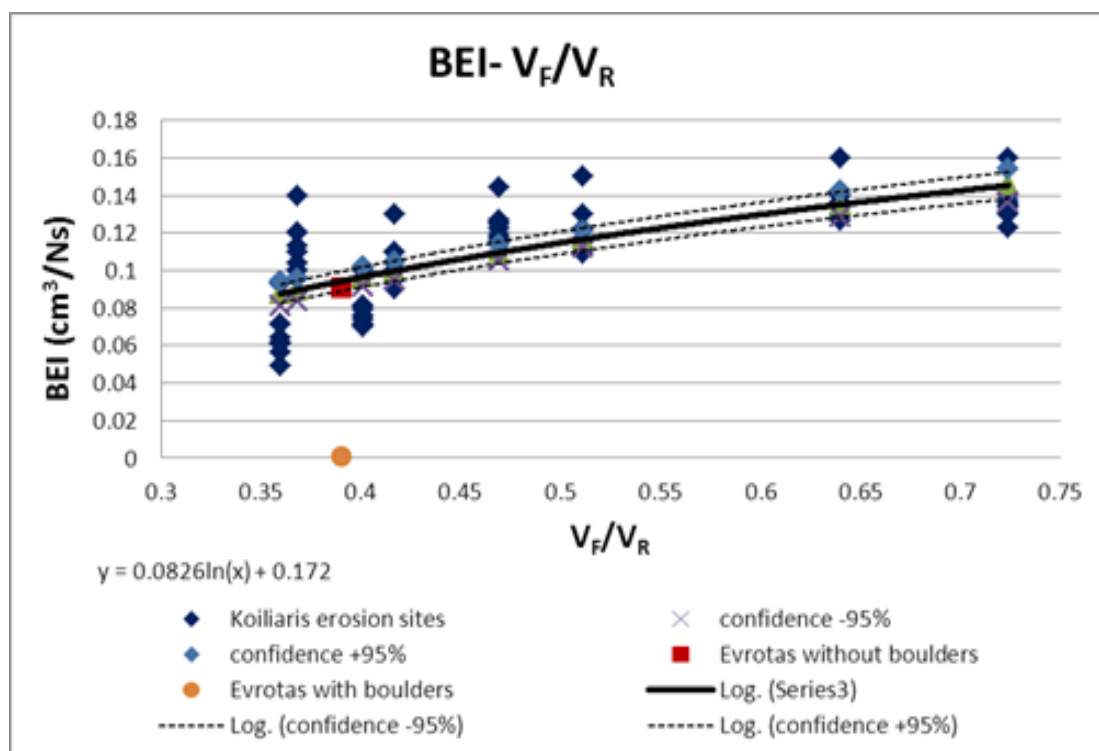
Σχήμα 7.4: Προφίλ διαβρωμένης όχθης μετά την τοποθέτηση λιθοδομών

Από τα δύο παραπάνω σχήματα παρατηρείται η διαφορά στις τιμές της συνολικής διαβρωμένης επιφάνειας, όπου πριν την τοποθέτηση των λιθοδομών αυτή υπολογίζεται στα  $2,954 \text{ m}^2$  ενώ μετά την τοποθέτηση λιθοδομών στα  $0 \text{ m}^2$ . Με λίγα λόγια γίνεται επαλήθευση του μοντέλου και επιβεβαίωση της κατάστασης στην πραγματικότητα.

### 7.8 Εφαρμογή και επαλήθευση της μεθοδολογίας της διάβρωσης στον ποταμό Ευρώτα

Σε τελευταίο στάδιο, επετεύχθη προσπάθεια να εφαρμοσθεί και να επαληθευτεί η παραπάνω μεθοδολογία και σε έναν μεγαλύτερο ποταμό διαλείπουσας ροής, τον Ευρώτα στη Λακωνία.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε μία θέση που βρίσκεται στην υπολεκάνη 99 με συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ 362010, 4103310. Για το πλημμυρικό γεγονός του Νοεμβρίου του 2005 υπολογίσθηκε ο λόγος  $V_f/V_R = 0,39$ . Επιπλέον υπολογίστηκε ο δείκτης διάβρωσης BEI τόσο για την πραγματική κατάσταση και γεωμετρία του πρηνούς ( $BEI = 0,08 \text{ cm}^3/\text{Ns}$ ), όσο και για την κατάσταση όπου υποτέθηκε ότι στη θέση ήταν ήδη τοποθετημένη λιθοδομή ( $BEI = 0,0012 \text{ cm}^3/\text{Ns}$ ). Τα αποτελέσματα αυτά για να συγκριθούν, τοποθετήθηκαν στην ανάλογη καμπύλη που είχε δημιουργηθεί για τον ποταμό Κοιλιάρη (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5: Σύγκριση τιμών BEI του Ευρώτα με αυτές του Κοιλιάρη

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα η τιμή ΒΕΙ που αφορά τη διάβρωση στον ποταμό Ευρώτα στην περίπτωση χωρίς τη λιθοδομή, πέφτει πάνω στην καμπύλη που δημιουργήθηκε για τον ποταμό Κοιλιάρη. Έτσι λοιπόν θα μπορούσε να ειπωθεί πως αυτή η καμπύλη είναι αρκετά αντιπροσωπευτική για πρηνή ποταμών ανάλογης ροής με αυτή του ποταμού Κοιλιάρη και ανάλογου υλικού.

Όσον αφορά την τιμή ΒΕΙ που αφορά τη διάβρωση στον ποταμό Ευρώτα στην περίπτωση της λιθοδομής θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι πολύ μικρή και πλησιάζει στο 0 διότι με την τοποθέτηση των λιθοδομών η διάβρωση σχεδόν δεν υφίσταται.

Τέλος, έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM στην εν λόγω θέση , για το πλημμυρικό γεγονός του Νοεμβρίου του 2005 τόσο για την πραγματική κατάσταση (Κατάσταση 1) όσο και για την υποτιθέμενη (Κατάσταση 2) . Επίσης, έγινε χρήση του μοντέλου στην ίδια θέση μετά την τοποθέτηση λιθοδομών στην παρόχθια περιοχή το έτος 2006 (Κατάσταση 3). Τα ποσοτικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.10 \*.

Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα μοντέλου στον ποταμό Ευρώτα

|                                  | Κατάσταση 1          | Κατάσταση 2        | Κατάσταση 3        |
|----------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Ποσό διάβρωσης (m <sup>2</sup> ) | 33,36                | 0,485              | 0,011              |
| FS                               | 0,35 <b>Unstable</b> | 1,88 <b>Stable</b> | 1,59 <b>Stable</b> |
| Πλάτος αστοχίας (m)              | 4,8                  | -                  | -                  |
| Όγκος αστοχίας (m <sup>3</sup> ) | 816                  | -                  | -                  |
| Φορτίο ιζήματος (kg)             | 1498315              | -                  | -                  |

\*Οι τιμές του Πίνακα 7.10 αφορούν 120 μέτρα μήκος καναλιού

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα**

Η διάβρωση των φυσικών πρανών είναι ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο προκαλείται από διάφορους παράγοντες και επηρεάζει την ισορροπία των οικοσυστημάτων.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή στόχευσε στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση του κινδύνου της διάβρωσης και της σταθερότητας ή μη του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη στην περιοχή του νομού Χανίων της Κρήτης. Επίσης στόχευσε στο να επιβεβαιωθεί η εν λόγω μεθοδολογία, αφού εφαρμοσθεί και σε έναν μεγαλύτερο ποταμό διαλείπουσας ροής, τον ποταμό Ευρώτα στο νομό Λακωνίας. Με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου BSTEM επετεύχθη προσπάθεια εξαγωγής ποσοτικών συμπερασμάτων που αφορούν τη διάβρωση και την αστοχία της όχθης, υπολογίζοντας τον συντελεστή ασφαλείας.

Αρχικά έγιναν δύο σενάρια κατά το υδρολογικό έτος 2005-2006 και για καθένα από αυτά, έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM. Όπως διαπιστώθηκε από τα ποσά διάβρωσης καθώς και τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ), τα τμήματα του ποταμού που μελετήθηκαν, κρίνονται ως «κρίσιμα» ως προς τη διάβρωση και την αστοχία. Παρατηρήθηκε ότι ακόμη και κατά το δεύτερο σενάριο όπου το πλημμυρικό γεγονός που μελετήθηκε ήταν μικρότερης έντασης σε σχέση με το πρώτο, τα τμήματα αυτά του ποταμού χαρακτηρίζονται και πάλι ασταθή. Επίσης, έγινε στατιστική ανάλυση και εκτιμήθηκε ότι η περίπτωση του πρώτου σεναρίου εμφανίζεται κάθε 200 χρόνια.

Σε επόμενο στάδιο έγινε συσχέτιση της αστοχίας του πρανούς με την απορροή και το υλικό της όχθης σε ένα διάστημα πλημμυρικών γεγονότων (10/1/2004 - 4/3/2009). Από αυτό διαπιστώθηκε πως το υλικό της όχθης και του ποδιού επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή ασφαλείας ( $F_s$ ), δηλαδή το αν θα αστοχήσει το πρανές ή όχι. Επίσης επιβεβαιώθηκε το ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της απορροής, τόσο πιο ασταθή είναι τα πρανή καθώς επίσης και το ότι η βλάστηση αποτελεί δύναμη αντίστασης ως προς την αστοχία.

Προκειμένου να γίνει μια συμπληρωματική εκτίμηση της διάβρωσης στα διάφορα σημεία του ποταμού Κοιλιάρη έγινε υπολογισμός ενός δείκτη διάβρωσης της όχθης (Bank Erosion Indicator). Ο δείκτης αυτός, όπως και το μοντέλο BSTEM, έδειξε ότι το πρανές του ποταμού είναι ιδιαιτέρως «επιρρεπές» στη διάβρωση. Επιπροσθέτως έγινε συσχέτιση του δείκτη αυτού με την απορροή για πιο σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα που σημειώθηκαν κατά το διάστημα 10/1/2004 - 4/3/2009. Η καμπύλη παρουσίασε πορεία αύξησης μέχρι ένα οριακό σημείο που αντιστοιχεί σε τιμές του δείκτη διάβρωσης  $0,16 \text{ cm}^3/\text{Ns}$ .

Επαληθεύτηκε το μοντέλο BSTEM και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στον ποταμό Κοιλιάρη για να εκτιμηθεί η διάβρωση και η αστοχία. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση του μοντέλου σε μία θέση πριν και μετά την τοποθέτηση λιθοδομών.

Σε τελευταίο στάδιο, επετεύχθη προσπάθεια να εφαρμοσθεί και να επαληθευτεί η παραπάνω μεθοδολογία και σε έναν μεγαλύτερο ποταμό διαλείπουσας ροής, τον Ευρώτα στη Λακωνία. Υπολογίστηκε ο δείκτης διάβρωσης για τη μεγάλη πλημμύρα του Νοεμβρίου του 2005 και έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM σε μία θέση της λεκάνης απορροής του ποταμού για τρία διαφορετικά σενάρια.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, επιβεβαίωσαν την πραγματικότητα και αυτό καθιστά το μοντέλο ως ένα αξιόπιστο και επαρκές εργαλείο και για περαιτέρω μελέτες καθώς ενσωματώνει την επίδραση πολλών παραμέτρων. Επίσης είναι εύκολο στη χρήση και αυτό του δίνει πλεονέκτημα έναντι άλλων ανάλογης κλίμακας.

Διευρύνοντας το υπό μελέτη θέμα ακολουθούν προτάσεις για την περαιτέρω εξέλιξή του:

- Το μοντέλο BSTEM θα μπορούσε να συνδυαστεί με άλλα μοντέλα, ώστε να ενσωματώσει και την επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που συμβάλλουν στο φαινόμενο της διάβρωσης
- Το εν λόγω μοντέλο θα μπορούσε να εξελιχθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη την επίδραση και άλλων εδαφικών παραγόντων που επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα του εδάφους

- Επίσης δεν δίνει τη δυνατότητα πολλών διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων και η διατμητική τάση υπολογίζεται από εμπειρικούς και όχι υδραυλικούς τύπους
- Δεν συνδέεται με μοντέλα υδραυλικής ή υδρολογικά
- Επιπροσθέτως μπορεί να εξελιχθεί ώστε να μπορούν να μελετηθούν ακραία καιρικά φαινόμενα όπου επικρατούν συνθήκες πλημμύρας, δηλαδή το ύψος της στάθμης του νερού υπερκαλύπτει το ύψος του πρανούς
- Η μελέτη της επιρροής της φυτοκάλυψης στην ευστάθεια των πρανών μπορεί να γίνει και για άλλα είδη φυτών (εκτός αυτών που ήδη υπάρχουν στο μοντέλο) εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα και έτσι να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί μια βάση δεδομένων για την επίδραση διαφόρων φυτών σε διάφορα είδη εδάφους

## **Βιβλιογραφία**

### **Ελληνική**

**Βοζινάκης Κ., 2004.** Υδατικοί πόροι Νομού Χανίων και Διαχείριση τους. Υπουργείο Γεωργίας-Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων, Χανιά

**Ζαλίδης Γ., 2008.** Ρύπανση και υποβάθμιση εδαφών. Σημειώσεις μαθήματος Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

**Κεραμίδας Β., 1997.** Γονιμότητα εδαφών. Σημειώσεις μαθήματος Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

**Κνιθάκης Μ., 1993.** Έκθεση επι των αποτελεσμάτων ιχνηθέτησης στην περιοχή των πηγών Στύλου Χανίων ΙΓΜΕ, Ρέθυμνο

**Μήτσιος Ι.Κ., Πασχαλίδης Χ.Δ., Παγανιάς Κ.Π., 1995.** Διάβρωση των εδαφών, Αντιδιαβρωτικά μέτρα προστασίας. Εκδόσεις ΖΥΜΕΛ, Αθήνα

**Μισοπολινός Ν.Δ., 1992.** Γεωλογία-Πετρογραφία. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη

**Μουλόπουλος Χ., 1968.** Ορεινή Υδρονομική. Θεσσαλονίκη

**Νικολαΐδης Ν.Π., Καρατζάς Γ., 2010.** Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη. Τεχνική Έκθεση. Χανιά

**Παναγιωτόπουλος Κ.Π., 2008.** Εδαφολογία. Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη

**Πάνου Δ.Α., 1982.** Ο πράσινος εθνικός φυτοτεχνικός χρυσός. Εκδόσεις Ευτυχία Δ.Πάνου, Αθήνα

**Παυλίδου Σ., 2004.** Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Παράρτημα Κρήτης, Ρέθυμνο

**Συλαίος Ν., 1990.** Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη

**Συλαίος Ν., Γήτας Ι., Συλλαίος Γ., 2007.** Εισαγωγή στα γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και στην Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη

**Συλλαίος Ν., Μπίλας Γ., Καραπέτσας Ν., 2007.** Χαρτογράφηση και αξιολόγηση γεωργικών εδαφών με τη χρήση Τηλεπισκόπησης και GIS. Σημειώσεις μαθήματος Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη

**Χατζηθεοχάρους Κ., 2005.** Υδρογεωχημική μελέτη του ποταμού Κοιλιάρη. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

### Ξένη

**Amore E., Modica C., Nearing M.A., Santoro V.C., 2004.** Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology* 293 (2004) 100-114

**Brazier R., Rowan J., Anthony S. and Quinn P., 2001.** "MIRSED" towards an MIR approach to modeling hillslope soil erosion at the national level. *Catena* 42: 59-79

**Brown L. R., 1984.** Conserving soils. In: Brown LR (ed) *State of the world*. Norton, New York, pp 53-75

**Croke J., Nethery M., 2006.** Modelling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models. *Catena* 67, 35- 49

**De Vente J., Poesen J., Bazzzoffi P., Van Rompaey A. and Verstraeten G., 2006.** Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the

importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1017-1034

**EL-Swaify S.A., 1997.** Factors affecting soil erosion hazards and conservation needs for tropical steepplands. *Soil Technology* (11), 3-16

**Evans R., 2002.** Soil loss prediction with three erosion simulation models. *Applied Geomorphology* 22: 187-208

**Follet R.F., Stewart B.A., 1985.** Soil erosion and crop productivity. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA

**Folly A., Quinton J. and Smith R., 1999.** Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, The Netherlands. *Catena* 37: 507-519

**Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A., 1978.** The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*

**Gavrilovic S., 1976.** Bujieni tokovi I erozija (Torrents and erosion). Prediction of average annual Gavrilovic in the torrential watershed. *Gradevinski kalendar*, Beograd, Servia

**Grunwald S. and Frede H., 1999.** Using the modified agricultural non-point source pollution model in German watersheds. *Catena* 37: 319-328

**Hairsine P., Rose C., 1992.** Modelling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. *Water Resources Research* 28 (1), 245-250

**Hanson G.J., 1990.** Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II - Development of an in situ testing device. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33 (1): 132-137

**Hanson G.J., Simon A. 2001.** Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. *Hydrological Processes* 15: 23-38

**Kinnell P., 2004.** Sediment delivery ratios: a misaligned approach to determining sediment delivery from hillslopes. *Hydrological Processes* 18: 3191-3194

**Kinnell P., 2008.** Sediment delivery from hillslopes and the Universal Soil Loss Equation: some perceptions and misconceptions. *Hydrological Processes* 22: 3168-3175

**Kuznetsov M.S., Gendugov V.M., Khalilov M.S., Ivanuta A.A., 1998.** An equation of soil detachment by flow. *Soil & Tillage Research* 46, 97-102

**Langendoen E.J., 2000.** CONCEPTS-CONservation Channel Evolution and Pollutant Transport System. Research Report 16, US Department of Agriculture Agricultural Research Service National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS.

**Lal R., 1994.** Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: Lal R (ed) *Soil erosion research methods*, 2nd edn. Soil and Water Conservation Society, St. Lucie Press, America pp 1-9

**Lenzi M. and Luzio M., 1997.** Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with Geographic Information System. *European Journal of Agronomy*, Volume 6, Issues 1-2, p. 1-14

**Loch R.J., Silburn D.M., 1996.** Constraints to sustainability—soil erosion In: Clarke, L., Wylie, P.B. (Eds.), *Sustainable Crop Production in the Sub-tropics: an Australian Perspective*. QDPI

**Lufafa A., Tenywa M., Isabirye M., Majaliwa M. and Woomer P., 2002.** Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss Model. *Agricultural systems* 73: 1-12

**Mitasova H. and Mitas L., 1999.** Modeling soil detachment with RUSLE 3d using GIS. University of Illinois at Urbana-Champaign

**Mohamed M., Aggarwal S. and R. de Silva, 2003.** Application of remote sensing and GIS on soil erosion assessment at Bata River Basin, India. Available on: <http://www.gisdevelopment.net/application>

**Mohamed A., Sylvain O., 2007.** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*, Volume 343, Issue 3-4, p. 187-202

**Morehead M.D., Syvitski J.P., Hutton E.W.H., Peckham S.D., 2002.** Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. *Global and Planetary Change*, Volume 39, Issue 1-2, Publisher: Elsevier, p. 95-110

**Morgan R. P. C., 1986.** Soil erosion and concervation. Davidson, Donald A. Publisher: Essex, New York: Wiley

**Morgan R. P. C., 1992.** Soil erosion in the Northern Countries of the European Community. EIW Workshop: Elaboration of a Framework of a Code of Good Agricultural Practices, Brussels, 21-22 May 1992

**Morgenstern N.R., Price V.R., 1965.** The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15: 79-93

**Nearing M. A., Lane L. J., Lopes V. L., 1994.** Modeling soil erosion. In: Rattan Lal, (Editor), *Soil Erosion Research Methods*, Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, Delray Beach, FL

**Parkera C., Simon A., Thornea C.R., 2008.** The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi, *Geomorphology*, Volume 101, Issue 4, Publisher: Elsevier, p. 533-543

**Partheniades E., 1965.** Erosion and deposition of cohesive soils, *Journal of Hydraulic Engineering* 11 (1): 105-139

**Renard K. G., Foster G. R, Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D.C., 1997.** Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703, USDA-ARS

**Renschler C. and Harbor J., 2002.** Soil erosion assessment tools from point to regional scales - the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology* 47: 189-209.

**Rode M. and Frede H. 1999.** Testing AGNPS for soil erosion and water quality modeling in agricultural catchments in Hesse (Germany). *Phys. Chem. And Earth* 24 (4): 297-301.

**Rose C.W., 1993.** Erosion and sedimentation. In: Bonell, M., Hufschmidt, M.M., Gladwell, J.S. (Eds.), *Hydrology and Water Management in the Humid Tropics: Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management*. Cambridge University Press, pp. 301-343.

**Simon A., Bankhead N., Mahacek V., Langendoen E., 2008.** Quantifying existing and potential reductions in sediment loads from streambanks. *Environmental and Water Resources Institute World Congress Proceedings*. Honolulu, HI

**Simon A., Curini A., 1998.** Pore pressure and bank stability: The influence of matric suction, In Abt SR, Young- Pezeshk J, Watson CC (eds.), *Water Resources Engineering '98*, ASCE: Reston, 358-363

**Simon A., Curini A., Darby S.E., Langendoen E.J., 2000.** Bank and near-bank processes in an incised channel *Geomorphology* 35: 183-217

**Schumacher T., Lindstrom M., Schrumacher J. and Lemme G., 1999.** Modelling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. Soil and Tillage Research 51: 331-339.

**Thorne C.R., Tovey N.K., 1981.** Stability of composite river banks. Earth Surface Processes and Landforms, p. 469-484

**Van der Kniff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L., 2000.** Soil Erosion Risk Assessment in Italy. European Commission, European Soil Bureau.

**Wischmeier W.H., Smith, D.D., 1962.** Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. Int. Assoc. Scient. Hydr. Pub. 59, p. 148-159

**Woodward D., 1999.** Method to predict cropland ephemeral gully erosion. Catena 37: 393-399.

**Yassoglou N., Montanarella L., Govers G., Van Lynden G., Jones R.J.A., Zdruli P., Kirkby M., Giordano A., Le Bissonnais Y., Daroussin J. & King D., 1998.** Soil Erosion in Europe. European Soil Bureau.

**Zhang L., O' Neil A. and Lacey S., 1996.** Modeling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. Environmental Software 11, Issues 1-3: 123-133.

### **Διαδίκτυο**

daskalosjf.blogspot.com

faosart-ianisdo.blogspot.com

hn.cma.nsw.gov.au

newworldencyclopedia.org